



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**HODNOCENÍ VLIVU TECHNOLOGIÍ OBRÁBĚNÍ NA
ANALÝZU TEXTURY POVRCHU TECHNICKÝCH PLASTŮ**

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF MACHINING TECHNOLOGIES ON THE ANALYSIS OF THE
SURFACE TEXTURE OF TECHNICAL PLASTICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Škeřík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Filip Škeřík**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Hodnocení vlivu technologií obrábění na analýzu textury povrchu technických plastů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude zabývat výzkumem vlivu konvenčních způsobů třískového obrábění na texturu povrchu funkčních ploch u vybraných technických plastů (rešerše v zadané oblasti). Zkušební vzorky budou připraveny technologiemi soustružení, frézování, broušení a leštění. Technologické podmínky obrábění budou přizpůsobeny dosažení přibližně stejných hodnot konečné drsnosti povrchu. Práce bude rovněž pojednávat o vlivu chlazení při obrábění plastových materiálů. Výstupem práce bude analýza naměřených dat, vypracování obrazové dokumentace obrobených povrchů a zhodnocení vhodnosti zvolených parametrů obrábění na výslednou texturu obrobených povrchů zkušebních vzorků.

Cíle diplomové práce:

Teoretická část – rešerše v oblasti technických plastů a možnosti jejich obrábění.

Rozbor parametrů textury povrchu.

Experimentální část – porovnání vlivu textury povrchu u vybraných zkušebních vzorků z technických plastů.

Analýza, zpracování a vyhodnocení naměřených dat.

Zhodnocení dosažených výsledků vzhledem k praktickému využití materiálů.

Seznam doporučené literatury:

PTÁČEK, L. a kol. Nauka o materiálu I. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2003. 516 s. ISBN 80-7204-193-2.

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Materiály pro řezné nástroje. Vyd. 1. Praha: MM publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce řeší vliv technologií třískového obrábění (soustružení, frézování, broušení a leštění) na texturu povrchu funkčních ploch u vybraných materiálů z technických plastů. V první části práce je proveden teoretický rozbor možností obrábění plastových materiálů. Dále je proveden rozbor nejčastěji používaných parametrů pro hodnocení drsnosti obrobeného povrchu a jejich vliv na funkčnost. V experimentální části práce je popsán postup přípravy vzorků, analýza naměřených dat a následné vyhodnocení s přínosem pro praxi.

Klíčová slova

obrábění, soustružení, frézování, broušení, leštění, technické plasty, polymery, textura povrchu, drsnost povrchu, profilové a plošné parametry

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the influence of machining technologies (turning, milling, grinding and polishing) on the surface texture of functional surfaces of selected materials from technical plastics. In the first part of the thesis there is a theoretical analysis of the possibilities of machining plastic materials. Furthermore, an analysis of the most commonly used parameters for evaluating the roughness of the machined surface and their effect on functionality is performed. The experimental part of the thesis describes samples preparation, analysis of measured data and subsequent evaluation with benefits for machinery industry.

Key words

machining, turning, milling, grinding, polishing, technical plastics, polymers, surface texture, surface roughness, amplitude and height parameters

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠKERŮ, Filip. *Hodnocení vlivu technologií obrábění na analýzu textury povrchu technických plastů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné

z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132461>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 74 s. 15 příloh. Vedoucí práce Josef Sedlák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Hodnocení vlivu technologií obrábění na analýzu textury povrchu technických plastů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

21. 05. 2021

Datum

Filip Škeřík

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji svému vedoucímu práce doc. Ing. Josefu Sedlákoví, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné připomínky, rady a vedení při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům Katedry strojírenství Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany v Brně, v jejíchž laboratořích bylo prováděno veškeré měření pro praktickou část této práce. Dík patří také firmě Plastic Parts and Technologies v Moravské Třebové, která umožnila část přípravy vzorků. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH.....	6
ÚVOD	8
1 TECHNICKÉ PLASTY	10
1.1 Rozdělení plastů.....	10
1.2 Porovnání plastových materiálů s kovy	11
1.3 Zpracování plastů.....	12
1.4 Vliv výroby polotovarů na proces obrábění	14
2 OBRÁBĚNÍ PLASTŮ	15
2.1 Vhodné řezné nástroje a stroje.....	16
2.2 Výrobní tolerance	17
2.3 Řezání plastů.....	17
2.4 Soustružení plastů	18
2.5 Frézování plastů	19
2.6 Vrtání plastů.....	21
2.7 Broušení plastů	25
2.8 Řezání závitů.....	25
2.9 Chlazení řezného procesu	26
2.10 Odstranění otřepů.....	27
2.11 Tepelné zpracování	27
3 TEXTURA POVRCHU	30
3.1 2D Profil povrchu	30
3.2 Vybrané parametry profilu drsnosti	32
3.3 3D profil povrchu.....	35
3.4 Vybrané plošné parametry drsnosti povrchu	36
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	38
4.1 Charakteristiky testovaných materiálů.....	38
4.2 Použité stroje.....	40
4.3 Použité měřicí přístroje	45
4.4 Příprava vzorků.....	47
4.5 Měření vzorků.....	50
5 HODNOCENÍ TEXTURY POVRCHU	52

5.1 Vyhodnocení textury povrchu – Ertacetal C.....	57
5.1.1 Technologie soustružení	57
5.1.2 Technologie frézování	58
5.1.3 Technologie broušení.....	59
5.1.4 Technologie leštění	60
5.1.5 Porovnání parametrů jednotlivých technologií obrábění.....	61
5.1.6 Zhodnocení naměřených parametrů vzhledem k praktickému využití.....	62
5.1.7 Vliv řezné rychlosti na výslednou drsnost povrchu.....	64
6 DISKUZE K DOSAŽENÝM VÝSLEDKŮM	65
ZÁVĚR	66
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	67
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	71
SEZNAM PŘÍLOH.....	74

ÚVOD

Velký rozmach výzkumu a vývoje plastových materiálů začal již během druhé světové války, jako levnější náhrada za klasické materiály (dřevo, sklo, kaučuk, ocel a jiné kovy). V současné době existuje celá řada polymerních materiálů a plastové výrobky se staly předměty každodenní potřeby. Nové polymerní materiály hrají důležitou roli v technologickém pokroku. Plasty nabízejí celou řadu výhod a v mnoha případech mohou účinně nahradit tradiční materiály. Polotovary a hotové komponenty z plastů se používají ve všech průmyslových odvětvích. Technické využití pro plastové produkty zahrnují nejen automobilový a strojírenský průmysl, ale také průmysl potravinářský, farmaceutický, chemický, stavební, elektrotechnický, jaderný, letecký a kosmický.

S širokým využitím polymerních materiálů se pojí vysoké nároky na kvalitu výrobků, od kterých se odvíjí volba výrobních a zpracovatelských technologií. V případě malých výrobních objemů je konvenční třískové obrábění rychlou a ekonomickou variantou, jak dosáhnout velmi přesné plastové součásti. Plastové materiály jsou v mnoha směrech odlišné od materiálů kovových, což je potřeba mít na paměti i v případě jejich obrábění. Jednoduše řečeno, základní principy obrábění kovů při obrábění plastů neplatí.

Povrch vzniklý obráběním výrazně ovlivňuje životnost a funkční spolehlivost součásti. Povrchová vrstva materiálu po jeho obrobení získá svůj specifický charakter a rozdílné vlastnosti od vnitřní hmoty materiálu součásti. Na povrchu, nebo těsně pod ním začínají procesy poruch, trhlin, únavy, degradace materiálu atd. Jedním z hodnotících prvků obrobeného povrchu je jeho drsnost. Drsnost povrchu má významný vliv na funkční plochy součásti a jejich třecí, těsnící, vibrační nebo mazací vlastnosti [1].

Cílem diplomové práce je zhodnotit technologie třískového obrábění polymerních materiálů. Experimentální část práce je zaměřena na zkoumání drsnosti povrchu vzorků z technických plastů, vyrobených odlišnými metodami třískového obrábění. Obrobené povrchy budou hodnoceny komplexně na základě profilových a plošných parametrů drsnosti povrchu vzhledem k praktickému využití testovaných materiálů.

Soustružení polymerního materiálu polyetylentereftalátu (PET) vyztuženého karbonovými vlákny popisuje článek [2]. K soustružení byla použita karbidová destička TPGN 16 03 04 H13A. Vzorky byly obráběny za těchto podmínek: $v_c = 75 \text{ m/min}$, $f = 0,05 \text{ mm/ot}$, $a_p = 0,5 \text{ mm}$. Jako výsledný hodnotící parametr drsnosti povrchu uvádí tento článek průměrnou aritmetickou úchylku profilu $R_a = 0,91 \text{ } \mu\text{m}$ [2].

Frézování polymeru onyx® (nylon) popisuje článek [3]. K frézování byla použita fréza z karbidu wolframu s AlTiN povlakem o průměru 3,175 mm. Vzorky byly obráběny za sucha i s použitím chladicí kapaliny při těchto podmínkách: $n = 6000 \text{ min}^{-1}$, $f = 600 \text{ mm/min}$, $a_p = 1,25 \text{ mm}$. Výsledná hodnota drsnosti povrchu byla při suchém obrábění $R_a = 2,78 \text{ } \mu\text{m}$ (čelní frézování) a $R_a = 2,87 \text{ } \mu\text{m}$ (válcové frézování). Za použití chladicí kapaliny bylo dosaženo výsledků $R_a = 3,40 \text{ } \mu\text{m}$ (čelní frézování) a $R_a = 3,60 \text{ } \mu\text{m}$ (válcové frézování) [3].

Soustružení polyamidového polymeru popisuje článek [4]. K soustružení byla použita destička ze slinutého karbidu VCMT 16T304. Vzorky byly obráběny za těchto podmínek: $v_c = 127,2 \text{ m/min}$, $f = 0,21 \text{ mm/ot}$, $a_p = 0,15 \text{ mm}$. Výsledná hodnota drsnosti povrchu byla $R_a = 2,53 \text{ } \mu\text{m}$ [4].

Soustružení vysokovýkonnostního polymeru PEEK CF30 popisuje článek [5]. K soustružení byla použita břitová destička s TiN povlakem (WNMG080408-TF). Vzorky o \varnothing 50 mm byly obráběny za těchto podmínek: nechlazeno, $f = 0,1$ mm/ot, $a_p = 0,5$ mm, $v_{c1} = 50$ m/min, $v_{c2} = 200$ m/min, $v_{c3} = 500$ m/min. Jako výstupy měření drsnosti uvádí tento článek průměrné aritmetické úchylky R_a a nejvyšší výšky profilu R_z s následujícími hodnotami: $R_{a1} = 0,69$ μ m, $R_{z1} = 3,70$ μ m; $R_{a2} = 0,54$ μ m, $R_{z2} = 2,88$ μ m; $R_{a3} = 1,18$ μ m, $R_{z3} = 5,50$ μ m [5].

Frézování vysokovýkonnostního polymeru TECAPEEK popisuje článek [6]. K frézování byla použita dvoubřitá čelní karbidová fréza o \varnothing 10 mm. Jako vzorek byla použita deska o rozměrech 160 x 50 x 15 mm. Obrábění probíhalo za těchto podmínek: $n_1 = 4000$ min⁻¹, $f_1 = 0,2$ mm/zub, $a_{p1} = 4$ mm; $n_2 = 8000$ min⁻¹, $f_2 = 0,3$ mm/zub, $a_{p2} = 8$ mm. Výsledné průměrné aritmetické úchylky profilu drsnosti dosahovaly těchto hodnot: $R_{a1} = 0,69$ μ m, $R_{a2} = 3,5$ μ m [6].

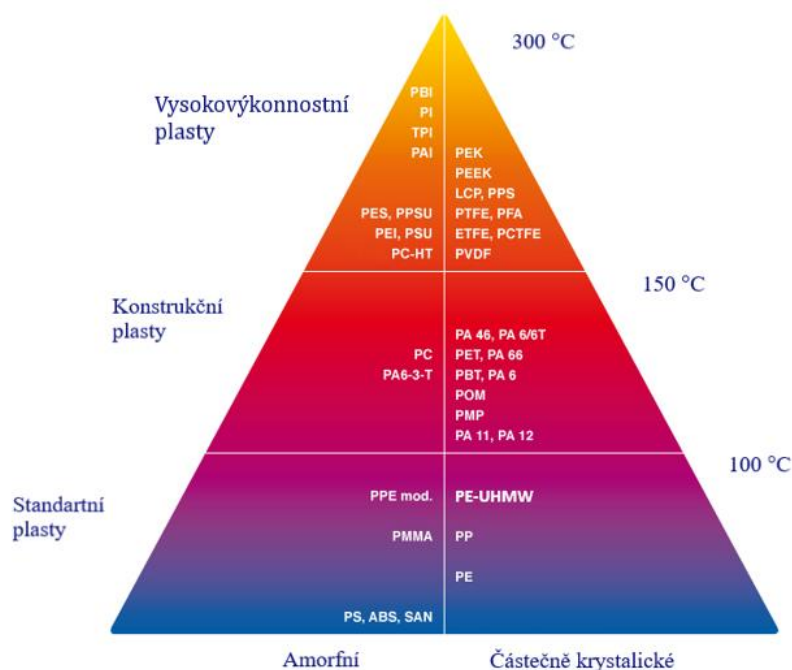
Broušení vysokovýkonnostního polymeru polyether ether ketone (PEEK) popisuje článek [7]. K broušení byl použit SiC brousicí kotouč (10C100H12VQ). Broušení probíhalo za těchto podmínek: chlazení stlačeným vzduchem, $f = 2000$ mm/min, $a_p = 30$ μ m, $v_{c1} = 5$ m/s, $v_{c2} = 10$ m/s, $v_{c3} = 15$ m/s. Výsledné průměrné aritmetické úchylky profilu drsnosti dosahovaly těchto hodnot: $R_{a1} = 1,7$ μ m, $R_{a2} = 1,6$ μ m, $R_{a3} = 2,5$ μ m [7].

1 TECHNICKE PLASTY

Plast je označení pro technický materiál s předepsanými vlastnostmi. Základem každého plastového materiálu je řetězec polymerů smíšený s dalšími nezbytnými přísadami (plniva, stabilizátory, maziva, barviva, atd.) určující vlastnosti plastu. Řetězce polymerů vznikají opakujícími se polyreakcemi nízkomolekulárních sloučenin – monomerů [8].

1.1 Rozdělení plastů

Plasty lze rozdělit do tří základních skupin. První skupinou jsou termosetové polymery neboli reaktoplasty. Tyto plasty tvoří síťovanou strukturu a po trojrozměrném chemickém zesíťování nedovolují žádnou další elastickou deformaci nebo tvarování. Po zatížení se tyto materiály trvale zdeformují a není možné je znovu tavit. Druhou skupinou plastů jsou elastomery. Elastomery také vytváří síťovanou strukturu, ale na rozdíl od reaktoplastů mají schopnost elastické deformace. Po zatížení změni svůj tvar a po odlehčení se opět vrátí do svého původního tvaru. Poslední nejpočetnější skupinu tvoří termoplastické polymery neboli termoplasty. Tyto plasty netvoří trojrozměrnou síťovanou strukturu, je možné je opakovaně tavit a přetvářet. Síly spojující termoplastické řetězce jsou méně silné než u předešlých dvou skupin plastů. Na základě jejich struktury se termoplastické polymery dále dělí na dvě podskupiny – amorfni a částečně krystalické termoplasty [9, 10].



Obr. 1 Rozdělení termoplastů [9].

Amorfni i částečně krystalické termoplasty je poté možné ještě rozdělit do tří sekcí částečně založených na jejich tepelné stabilitě. Od standartních plastů s dlouhodobě udržitelnou servisní teplotou do 100 °C, přes technické (konstrukční) plasty s teplotní stabilitou do 150 °C, po vysoce výkonnostní plasty zvládající teploty až kolem 300 °C. Rozdělení termoplastů podle tepelné stability je znázorněno na obr. 1 v pyramidovém diagramu včetně uvedených příkladů typických termoplastů pro danou skupinu [9].

1.2 Porovnání plastových materiálů s kovy

Ve srovnání s kovy plasty nesou jistá omezení, avšak na druhou stranu mohou nabídnout celou řadu výhod. Zejména u komponentů, které mají příznivý poměr mezi hmotností a potřebnou pevností. Dále plasty mohou nahradit kovové komponenty, které požadují chemickou odolnost, elektrickou nevodivost nebo propustnost elektromagnetického záření. Plasty také oproti kovovým materiálům lépe absorbují hluk a vibrace. Mezi hlavní nevýhody plastových materiálů se řadí nižší mechanické vlastnosti, nižší tepelná odolnost a vyšší tepelná roztažnost. Porovnání vlastností je uvedeno v tab. 1. Při nahrazování jiných materiálů je potřeba všechny tyto vlastnosti zohlednit a případně pozměnit i mechanický vzhled dané komponenty. Plasty vyžadují větší výrobní tolerance než kovy. Všechny výhody a nevýhody plastů ve srovnání s kovy jsou shrnuty níže [9, 11].

Hlavní výhody plastů:

- nízká hmotnost,
- absorpce hluku a vibrací,
- elektricky vodivé i nevodivé,
- chemická odolnost,
- propustnost elektromagnetického záření,
- korozivzdornost,
- tepelná izolace,
- samomazné vlastnosti.

Omezení plastových materiálů:

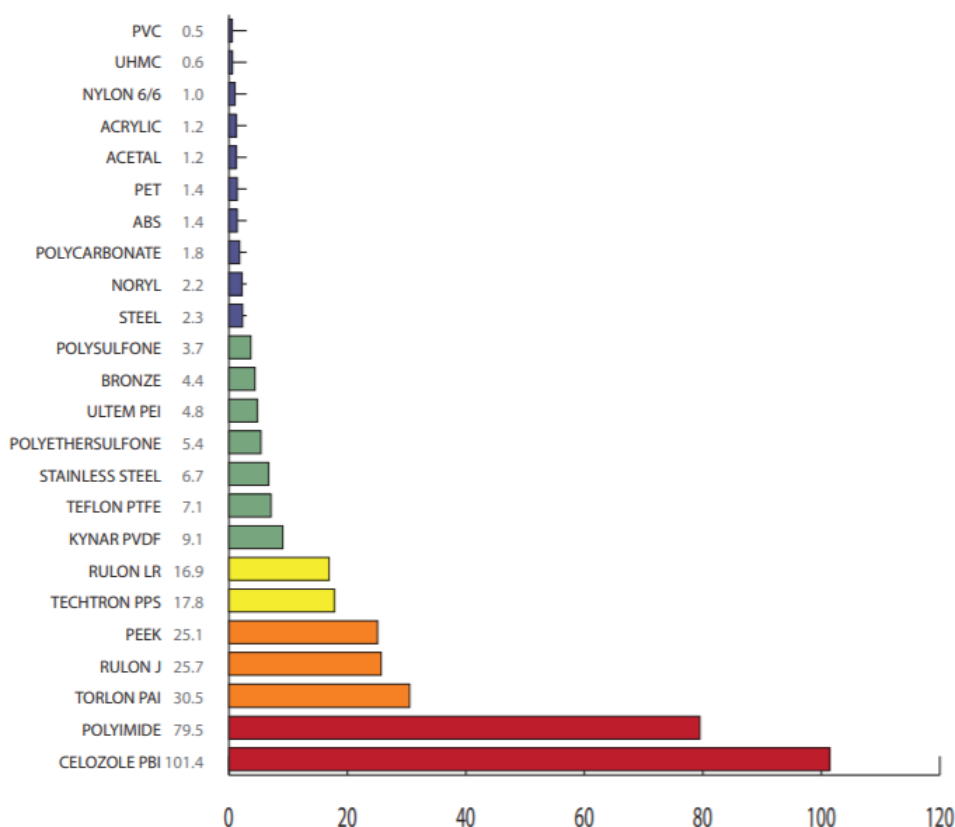
- nižší mechanické vlastnosti,
- poměrně nízká tepelná odolnost,
- vyšší tepelná roztažnost,
- nízká tepelná vodivost.

Dle možností daného materiálu lze veškeré vlastnosti upravit pomocí přísad, plniv a vyztužujících vláken. [12].

Tab. 1 Porovnání materiálových vlastností [13, 14].

	Uhlíková ocel	PEEK (čistý)	Nylon (PA6)	Hliník	Měď
Hustota [kg/m ³]	7850	1400	1100	2700	8960
Modul pružnosti v tahu [GPa]	210	3,60	2,76	71	123
Max. provozní teplota [°C]	836	260	110	350	204
Koeficient tep. roztažnosti [10 ⁻⁶ /K]	13	50	85	22,2	16,6
Koeficient tep. vodivosti [W/mK]	47	0,25	0,20	204	395
Součinitel tření [-]	0,8	0,2	0,2	1,2	1

Plastové materiály mohou být náhradou za tradiční slitiny hliníku a mědi, nerezovou ocel a litinu. Díky svým vlastnostem mohou být použity i v náročných podmínkách, které nepříznivě působí na výše uvedené materiály a snižují životnost součástí. Ovšem je potřeba mít na paměti, že tyto vysoce výkonnostní plastové materiály mohou mnohdy mít i několikrát vyšší cenu než materiály kovové. Je třeba důkladně vybrat vhodný materiál a výrobní technologii pro danou součást, aby byly efektivně splněny technické i ekonomické požadavky. V grafické závislosti na obr. 2 lze vidět porovnání relativní ceny plastových materiálů s kovovými materiály, jako je např. ocel nebo bronz [10].



Obr. 2 Porovnání relativní ceny materiálů [10].

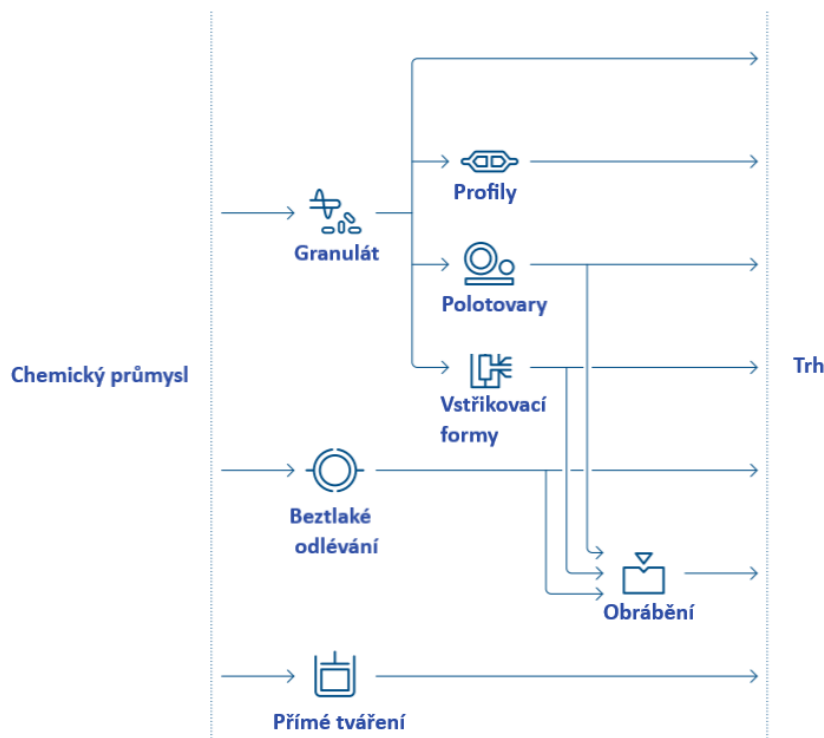
Výběr materiálu by měl být založen na funkci vyráběné součásti a prostředí, ve kterém bude použita. Při výběru plastu je třeba brát v úvahu zejména mechanickou pevnost, tepelnou odolnost, trvanlivost, absorpci vlhkosti, elektrickou vodivost, eliminaci hluku, odolnost proti korozi a opotřebení atd. [15].

1.3 Zpracování plastů

Jakou metodou se plasty dále zpracovávají, často určuje samotný druh materiálu nebo výsledný produkt. Zvolená metoda zpracování závisí zejména na objemu výrobní série, rozměrech součásti a v neposlední řadě na požadované jakosti vyráběné komponenty. V některých případech výroby dochází ke kombinaci více metod zpracování k efektivnímu dosažení konečného produktu. Schéma nejvíce používaných procesů zpracování plastů je znázorněno na obr. 3 [9, 16].

K výrobě přesných hotových dílů jsou používány především následující technologie. První je technologie přímého tváření lisováním. Druhou, nejvíce využívanou technologií, je použití vysokotlaké vstřikovací formy. U této metody je zapotřebí i vstřikovací lis. Výroba obou typů forem je poměrně nákladná a vyplatí se až v případě velkých výrobních sérií. Třetí možností je beztlaké odlévání, které je vhodné zejména pro silnostěnné komponenty. Tato technologie je použitelná pro malé a střední objemy výroby [9].

V případě nízko sériové produkce, nebo z jiných, např. tvarových důvodů, je možné součásti vyrábět konvenčními způsoby třískového obrábění z předem vytvořených polotovarů. Produkty ze vstřikovacích nebo licích forem, případně prototypy z 3D tisku, mohou být také po odlití ještě obráběny za účelem dohotovení nebo dosažení vyšší jakosti výrobku, např. odstranění nežádoucího materiálu z oblasti vtokového kanálku nebo dělicí roviny [9, 16].



Obr. 3 Schéma zpracování plastů [9].

Shrnutí vhodnosti použití technologií obrábění:

- Nízké počáteční náklady – formovací zařízení vyžaduje velké počáteční investice do nástrojového vybavení. Obrábění je ekonomické pro menší výrobní objemy.
- Přesné rozměrové tolerance – obrábění umožňuje dosáhnout mnohem užší rozměrové tolerance, než jaké lze dosáhnout jinou výrobní technologií.
- Omezení vlivem materiálových vlastností – některé materiály (jako např. PTFE nebo UHMW) nelze utvářet za pomoci formy a vyžadují přímo technologii obrábění.

- Úroveň nahromaděného napětí – vstřikované díly jsou vystaveny větší úrovni vnitřního napětí než protlačované polotovary s tepelnou úpravou. Obráběné díly mají konzistentnější strukturu [10].

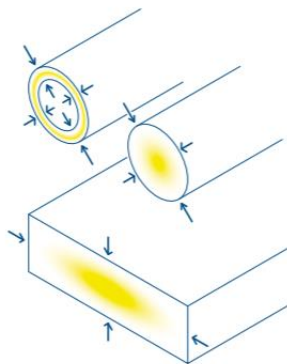
1.4 Vliv výroby polotovarů na proces obrábění

Plastové polotovary lze vyrobit různými technologiemi zpracování. Technologie jsou nejčastěji voleny podle druhu plastu a mají také vliv na vlastnosti vyrobených polotovarů. Základní polotovary jsou vyráběny nejčastěji ve formě tabulí, tyčí nebo trubek v široké škále rozměrů a barev [9, 11].

Pro polotovary z PTFE nebo polyamidů se používají především technologie lisování a slinování. Při tomto procesu se používají plastové prášky, které jsou lisovány při vysoké teplotě a tlaku (pod teplotou tání materiálu). Hlavní výhodou je, že nevzniká vnitřní napětí uvnitř polotovaru. Tento proces je však časově a pracovní náročný, a proto i poměrně nákladný [9, 11].

Další, více využívanou technologií výroby polotovarů, je metoda protlačování. V tomto procesu je materiál ve formě granulátu taven a poté protlačován příslušnou tvarovou matricí s chladicím systémem. Dochází k homogenizaci materiálu a ke kalibraci rozměru. Polotovary pomalu chladnou směrem od okraje ke středu a podléhají smršťování (obr. 4). Nízká tepelná vodivost plastů má za následek různé rychlosti chlazení materiálu. Plast na okraji polotovaru tuhne rychleji než v jeho středu. Tuhá mezní vrstva na okraji brání smršťování materiálu ve středu polotovaru a dochází tak ke vzniku vnitřního napětí. Vlivem vnitřního napětí může dojít k roztržení nebo zlomení obrobku při obrábění. Vnitřní napětí je možné potlačit specifickým žiháním pro daný materiál (viz kap. 2.11) [9, 11].

Pro výrobu podstatně větších rozměrů polotovarů je používána technologie beztlakového odlévání. Polotovary vyrobené pomocí této metody mají nižší úroveň vnitřního napětí než ty protlačované [9].



Obr. 4 Chladnutí polotovarů [11].

Rozměrově přesné díly mohou být vyrobeny pouze z polotovarů zbavených vnitřního napětí, vznikajícího vlivem výroby. V opačném případě bude teplo generované obráběním nevyhnutelně vést k uvolnění pracovního napětí a deformaci součástí [9].

2 OBRÁBĚNÍ PLASTŮ

V první řadě je potřeba si uvědomit, že plast není kov. Přestože, oba materiály jsou technicky obrobitelné, tím jejich podobnosti končí. Zatímco kovy si zachovávají svůj tvar a mají předvídatelnou teplotu tání, plasty se mohou rozpínat až na několiknásobek svého původního rozměru a nabízejí různé teplotní tolerance. Jednoduše řečeno, základní principy obrábění kovů při obrábění plastů neplatí [10].

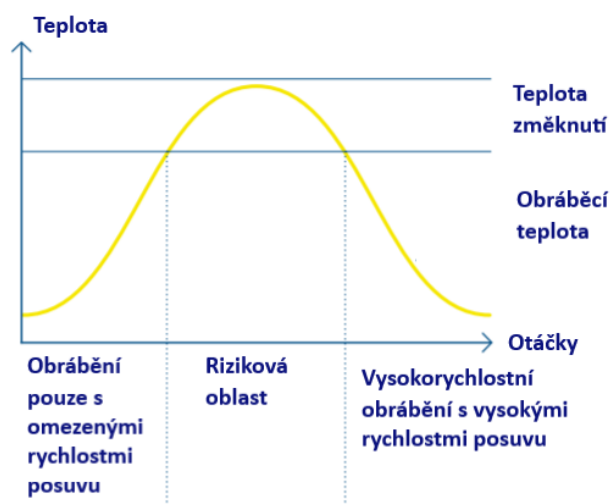
Plasty lze obrábět třískovým obráběním. Tvorba třísky záleží na typu materiálu a jeho struktuře. Většina plastových materiálů má tendenci k tvorbě dlouhé nedělené třísky, která může působit potíže při obrábění (např. poškrábat obrobený povrch). Dlouho nedělenou třísku tvoří zejména vyztužené plasty. Vlivem vláken uvnitř materiálu vzniká tříska vyztužených plastů štěpením nebo křehkým lomem, podobně jako v případě litin. V případě nevyztužených plastů lze tvoření třísky přirovnat spíše k oceli, kdy vzniká prostřednictvím plastických deformací [12].

Aby bylo možné vyrábět vysoce kvalitní, odolné, přesně rozměrově dimenzované a bezchybné komponenty, je třeba věnovat stejnou pozornost nástrojům a parametrům zpracování, jako charakteristikám konkrétních materiálů. Stejně jako u kovových materiálů, je nutné rozlišovat jednotlivé druhy plastů a je potřeba zohlednit odlišné vlastnosti plastových materiálů při jejich zpracování [9, 11].

Specifické vlastnosti plastů mají rozhodující vliv na jejich obrábění. Zejména mnohonásobně vyšší tepelná roztažnost a nízká tepelná vodivost mohou způsobit potíže při práci s plasty. Při obrábění materiálu, vlivem tření nástroje o obrobek, dochází k nárůstu tepla. U kovových materiálů je teplo dostatečně odváděno pomocí třísky, avšak v případě plastů může dojít k přílišnému zahřívání celého obrobku. Při působení vyšších než provozních teplot může dojít k tepelnému ovlivnění materiálu. Reaktoplastické materiály mají tendenci uhelnatět, zatímco termoplasty měknout a ztrácet svůj původní tvar. Vysoká teplota také může zapříčinit roztažení materiálu, nahromadění napětí a následnou deformaci obrobku [9, 12].

Během obráběcího procesu se téměř všechna řezná práce přeměňuje na teplo vlivem kontaktu nástroje s obrobkem. Celkové teplo je pak součet tepla vzniklého v oblasti plastické deformace tvorby třísky, tepla vzniklého třením třísky po čele nástroje a tepla vzniklého třením hřbetu nástroje po obrobené ploše. Vzniklé teplo řezného procesu je odváděno pomocí jednotlivých prvků řezného systému (tříska, obrobek, nástroj, prostředí). V ideálním případě je co nejvíce tepla odváděno pomocí třísky, ovšem to závisí na tepelné vodivosti obráběného materiálu [17].

Z výše uvedených informací je patrné, že základem pro výrobu kvalitních plastových součástí je udržení správné teploty při jejich obrábění. Kromě chladicího média a použití správného nástroje mají nejzásadnější vliv na obráběcí teplotu vhodně zvolené řezné podmínky. Z grafické závislosti na obr. 5 lze vidět, že plasty lze obrábět buď při nízkých otáčkách s omezenými rychlostmi posuvu, nebo naopak při velmi vysokých otáčkách s vysokými posuvovými rychlostmi. Z hlediska praxe je právě druhý způsob neekonomičtější volbou při obrábění plastů. Konkrétní řezné podmínky pro často používané plastové materiály jsou uvedeny na obr. 9 na straně 23 této práce [11].



Obr. 5 Vliv řezné rychlosti (otáček) [11].

2.1 Vhodné řezné nástroje a stroje

K obrábění plastových polotovarů se používají běžné stroje z kovoobráběcího nebo dřevozpracujícího průmyslu. Pro většinu plastů jsou vhodné nástroje z klasické rychlořezné oceli (HSS). Při obrábění vyztužených plastů dochází k silnému abrazivnímu opotřebení nástroje o vlákna. V případě obrábění vyztužených plastů nebo velkých výrobních objemů je vhodné použít nástroje ze slinutých karbidů (např. wolframu), keramiky nebo diamantu (PCD). V zásadě jsou vhodné nástroje, které se používají při obrábění hliníkových a měděných slitin. V případě většího objemu výroby a s požadavky na dosažení co nejkvalitnějšího výsledku po obrábění se doporučují speciální nástroje pro obrábění plastů. Úhel čela nástroje by měl být kladný, aby byl co nejmenší kontakt mezi nástrojem a obráběnou součástí. Podmínkou dosažení kvalitního obrobeného povrchu jsou dokonale ostré a hladké břity [1, 11, 18].

Vlivem nízké tepelné vodivosti plastových materiálů dochází k vysokému tepelnému zatěžování břitu nástroje a k jeho opotřebení. Zejména při obrábění reaktoplastů a vyztužených plastových materiálů, kde je většina vzniklého tepla odváděna pomocí nástroje (viz tab. 2). Břit je také významně opotřebováván adhezním otěrem kvůli vysoké přilnavosti plastových materiálů. Povrch břitu by měl být vždy dokonale hladký, aby se předešlo nalepování materiálu z obrobku na nástroj. Je důležité, aby byl nástroj používán pouze k obrábění plastů a nepoužíval se k obrábění jiných, zejména kovových, materiálů [1, 12, 18].

Tab. 2 Procentuální odvod tepla při obrábění [1].

Odvod tepla [%]	Ocel	Termoplast	Reaktoplast	CFRP	GFRP
Třískou	75	50 až 57	2 až 3	5 až 8	8 až 10
Obrobkem	20 až 22	15 až 20	5 až 8	5 až 10	10 až 15
Nástrojem	3 až 5	20 až 25	80 až 90	70 až 80	70 až 80
Prostředím	3 – 5 (suché obrábění)				

CFRP – vyztužený kompozit keramickými vlákny,

GFRP – vyztužený kompozit skleněnými vlákny.

2.2 Výrobní tolerance

Z důvodu vyššího koeficientu tepelné roztažnosti, nižší tuhosti, elasticity, absorpce vlhkosti (zejména u nylonů) a náchylnosti na deformace způsobené vnitřním napětím nelze s plastovými materiály dosáhnout tak přesných obráběcích tolerancí, v jakých jsou vyráběny součásti z kovových materiálů. Vodítkem běžně dosahovaných tolerancí při soustružení a frézování bez zvláštních opatření může být zhruba 0,1 až 0,2 % jmenovitého rozměru. Minimální tolerance pro malé rozměry je 0,05 mm. Přesnějších tolerancí je možné dosáhnout pouze se stabilními materiály, které se řadí do skupiny pokročilých technických plastů (high – tech). Mezi tyto materiály patří např. CELAZOLE® PBI, TORLON® PAI, KETRON® PEEK and TECHTRON® PPS [19].

Některé plastové materiály mohou absorbovat vlhkost z prostředí, což může způsobit změnu jejich rozměrů. Takové materiály by měly být skladovány v uzavřených pytlích s látkou pohlcující vlhkost. Nanesení filmu z čistého minerálního maziva nebo oleje také napomáhá materiálu snížit absorpční vlastnosti [19].

2.3 Řezání plastů

Plasty lze dobře řezat pomocí pásové nebo kotoučové pily. Výběr vhodné varianty závisí zejména na řezaném materiálu, jeho rozměrech a tvaru. Pásové pily jsou vhodnější pro řezání kulatých tvarů - dělení tyčí a trubek na požadovanou velikost. Pásové pily umožňují všestranné použití pro přímé, souvislé nebo nepravidelné řezy. Kotoučové pily se více hodí pro řezání desek. Nejlepších výsledků se dosahuje s pilovými pásy a kotouči s karbidovou (např. karbid wolframu) nebo PCD špičkou. Ostří musí být velmi dobře naostřeno, aby se co nejvíce snížilo tření mezi ostrím a materiálem. Vlivem tření se generuje teplo a může tak dojít k deformaci řezaného materiálu, proto je vhodné vždy chladit. Výhodou pásové pily je dlouhé ostří, které lépe odvádí generované teplo. Při řezání plastů je doporučeno používat podpěrné klíny spolu s příslušným napínacím zařízením k omezení vibrační materiálu. Použití dostatečně vysoké posuvové rychlosti zabraňuje lepení pilového ostří a nedochází k tepelnému ovlivňování materiálu v místě řezu [10, 11].

Doporučují se pilové pásy s širší roztečí zubů, aby bylo zajištěno dobré odstraňování třísek. Ke snížení tepla napomáhá neutrální nebo pozitivní úhel čela. Zároveň větší odsazení zubů (vyosení) snižuje tření při řezání a zabraňuje sevření pily v materiálu. Doporučené odsazení zubů je 3 až 10 ° [10, 19].

Alternativní možností pilových pásů a kotoučů je řezání vodním paprskem. Tato metoda je jednak mimořádně přesná a hlavní výhodou je, že nedochází k zavádění tepla

do materiálu. Také laserové technologie mohou být účinné při řezání tenkých vrstev, ovšem tato metoda se spíše nedoporučuje z důvodu příliš velkého tepla, které vede k tavení materiálu [15, 1].

Zde jsou shrnuty nejčastější potíže, které vznikají při řezání plastů a jejich hlavní příčiny [11]:

- povrch měkne a taví se
 - tupý nástroj,
 - nedostatečná boční vůle (malé odsazení zubů),
 - nedostatečný přísun chladicí kapaliny.
- hrubý povrch
 - příliš vysoký posuv,
 - špatně naostřený nástroj,
 - ostří není honované.
- spirálové stopy na povrchu
 - tření nástroje během vytahování,
 - otřep na nástroji.
- tvorba konkávního nebo konvexního povrchu
 - nástroj není svislý vzhledem k vřetenu pily,
 - jinak vychýlený nástroj,
 - příliš vysoký posuv,
 - příliš velký úhel ostří.
- tvorba otřepů
 - tupý nástroj,
 - příliš vysoký posuv,
 - nedostatečný úhel ostří.

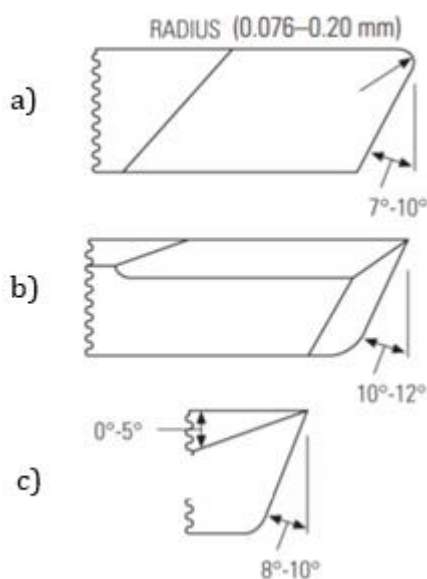
2.4 Soustružení plastů

Plasty lze obrábět na běžných komerčně dostupných soustruzích. Pro dosažení optimálních výsledků by se však měly používat speciální řezné nástroje určené pro plasty. Ty zajišťují optimální povrch a snižují hromadění materiálu na nástroji a obrobku. Rychlořezná ocel, jemně zrnitý karbid nebo PCD jsou obecně nejlepší volbou pro soustružnické operace. Řezné hrany nástroje by měly být ostré s leštěným povrchem. Špička nástroje by měla mít malý poloměr zakřivení (0,08 až 0,2 mm). Úhel čela nástroje by měl být kladný v rozsahu 0 až 5 °. Úhel hřbetu 6 až 10 °. Uvedené hodnoty jsou orientační a liší se pro každý materiál. Geometrie vhodného nástroje pro obrábění plastů je znázorněna na obr. 6. Nástroj s ostřejším úhlem břitů lépe vniká do materiálu, a snižuje se tak řezný

odpor materiálu. Všeobecně plastové materiály mají tendenci při soustružení tvořit dlouhou nedělenou třísku, a proto je vhodné používat nástroje s utvařčem třísky [10, 18].

Potíže s dlouho nedělenou třískou a jejím namotáváním na obrobek a nástroj lze také vyřešit pomocí odsávacího systému, který třísku natáhne a odvádí ji pryč z místa řezu do nádoby s odpadním materiálem. Odsávací systém rovněž slouží jako chladicí zařízení [20].

Při upínání obrobku je potřeba myslet na nižší mechanické vlastnosti a pružnost plastových materiálů. V případě delších obráběných kusů, je dobré obrobek podepřít nebo upnout mezi hroty, aby se co nejvíce minimalizovaly vibrace součásti, které mají nepříznivý vliv na konečný obrobek [10].



Obr. 6 Geometrie řezného nástroje [18]: a) horní pohled, b) boční pohled, c) přední pohled.

2.5 Frézování plastů

Také k frézování plastů jsou používána běžná frézovací centra jako v kovoobráběcím průmyslu. Při frézování se upřednostňuje sousledné frézování před nesousledným z důvodu větší tepelné stability. Při nesousledném frézování dochází k prudkému nárůstu tepla, které je v případě plastů velmi škodlivé [10, 20].

Nástroje použité při frézování by měly být hrubozubé, nejvýše se dvěma řeznými hranami, aby se minimalizovaly vibrace a byl co největší prostor pro odvod třísky. Optimálního řezného výkonu a kvality povrchu je dosaženo pomocí nástrojů s pouze jednou řeznou hranou [9, 12].

Nejobtížnějším úkolem při frézování je správné upnutí obrobku, aby se zamezilo jeho pohybu a vibracím během obrábění a zároveň se součást pod příliš velkým tlakem nedeformovala. I sebemenší vibrace mohou mít za následek velmi nekvalitní povrch obráběné součásti. Nejšetnější způsob upnutí plastových obrobků je pomocí vakuového systému. Tento způsob upnutí však vyžaduje plochý povrch obrobku, a proto nelze vždy využít. Při upnutí do svěráku případně pomocí upínek je potřeba dát pozor, aby nedošlo

k přílišnému namáhání obrobku a následně jeho zkroucení nebo prohnutí. Použití měkkých čelistí nebo upnutí v kombinaci s oboustrannou lepicí páskou může být vhodným řešením. Před nalepením pásky je potřeba všechny povrchy důkladně očistit a odmastit. Pro odstranění lepidla z pásky je vhodný např. čistič na bázi alkoholu. V případě vícekusové výroby je další možností výroba vhodného upínacího přípravku [10, 15].

Další potíže při frézování mohou způsobovat vzniklé otřepy, které nejčastěji vznikají na okraji obrobku při výjezdu frézy z materiálu. Čistého řezu až k okraji obráběné součásti lze dosáhnout připevněním jiného materiálu k okraji obrobku tak, aby řezný nástroj pokračoval do tohoto sekundárního materiálu a první materiál se mohl o něho opřít. Problém tvorby otřepů se týká zejména rovných hran. Případným řešením je hrany zkosit. Způsoby odstraňování vzniklých otřepů jsou uvedeny v kap. 2.10 této práce [10].

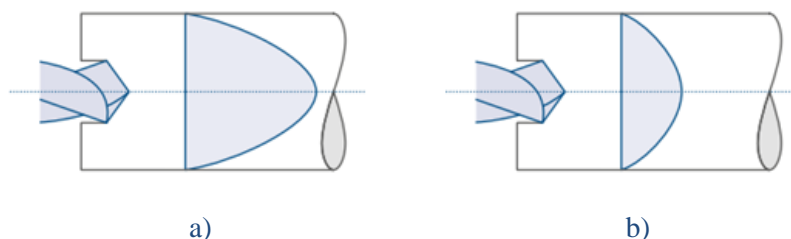
Zde jsou shrnuty nejčastější potíže, které vznikají při frézování a soustružení plastů a jejich hlavní příčiny [11]:

- spálený nebo natavený povrch
 - tupý nástroj,
 - nedostatečný pracovní záběr,
 - nástroj se tře o materiál jinou než řeznou plochou,
 - příliš nízký posuv,
 - příliš vysoké otáčky vřetene.
- hrubý povrch
 - příliš vysoký posuv,
 - příliš velký pracovní záběr,
 - ostrá špička břitů nástroje (vyžaduje se malý rádius),
 - špatně upnutý nástroj.
- tvorba otřepů při výjezdu z materiálu
 - tupý nástroj,
 - materiál se nemá o co opřít,
 - nástroj bez vodicího úhlu,
 - malý pracovní záběr.
- tvorba prasklin nebo odlupování v rozích
 - příliš pozitivní sklon čela nástroje,
 - tupý nástroj,
 - malý pracovní záběr,
 - nástroj upnutý pod středem,
 - ostrá špička břitů nástroje (vyžaduje se malý rádius).

- chvění v průběhu obrábění
 - příliš velký rádius špičky,
 - špatně upnutý nástroj,
 - nedostatečné vedení materiálu,
 - příliš široký záběr břitu (rozdělit na 2 průjezdy).

2.6 Vrtání plastů

Při vrtání dochází k vytváření tepla více než při jakékoli jiné operaci. Kromě nízké tepelné vodivosti je třeba věnovat zvláštní pozornost i izolační vlastnosti plastů. Izolační vlastnost způsobuje rychlé hromadění tepla uvnitř otvoru, obzvláště při vrtání hlubokých děr (hloubka díry je více než dvojnásobek jejího průměru). Vlivem nahromaděného tepla dojde k natavení plastu a zanesení vrtáku, který se rozpíná, a tím dochází k růstu tlakového napětí uvnitř vrtané součásti. Následkem příliš velkého napětí je deformace v podobě rozměrové nepřesnosti, vzniku praskliny nebo dokonce roztržení celé součásti. Zejména při vrtání do středu kulaté tyče. Při vrtání jsou obzvláště kladeny vysoké nároky na ostrý nástroj (viz obr. 7) [9, 11].

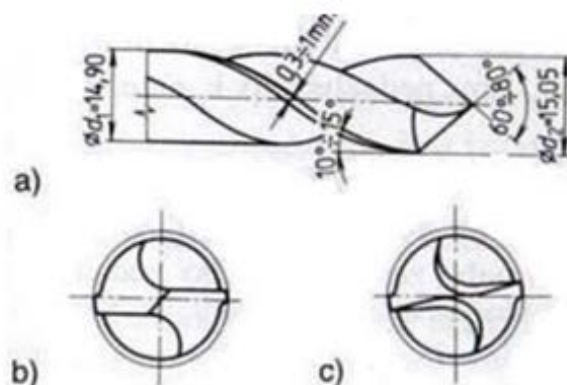


Obr. 7 Vývoj napětí při vrtání plastů [9]: a) tupý vrták, b) ostrý vrták.

Pro vrtání standardních měkkých plastů se běžně používají dobře naostřené spirálovité vrtáky z rychlořezné oceli (HSS). V případě vyztužených plastů vlákny je vhodné použít karbidové nebo diamantové vrtáky. Ke snížení tření a zamezení hromadění tepla jsou vhodné vrtáky spíše s ostrým vrcholovým úhlem (60 až 80 °). Je však možné použít i vrtáky s úhlem 90 až 120 °. Úhel stoupání šroubovice vrtáku (*twist angle*) by měl být v rozmezí 10 až 18 °. Hladká a široká drážka pomáhá optimálnímu odvodu třísek. Řezný břit by měl být vybroušen tak, že jeden okraj je kratší než druhý (zhruba o 0,01 až 0,2 mm). Geometrie vrtáku je znázorněna na obr. 8 [10, 12, 19].

Při vrtání je nutné vždy použít chlazení. Zároveň časté vytahování vrtáku pomáhá s odvodem třísky a také slouží jako dodatečné chlazení. Nedoporučuje se ruční posuv, aby nedošlo k zakousnutí vrtáku do materiálu a prasknutí vrtané součásti. U tenkostěnných komponentů se doporučuje použít vysoká řezná rychlost. Díry s velkými průměry je dobré nejprve předvrtat menším vrtákem, použít dutý vrták nebo vyrobit pomocí soustružnického nože [10, 11].

Při vrtání děr na skrz, je potřeba u konce snížit posuvovou rychlost, aby nedošlo k protlačení vrtáku materiálem. V první fázi dojde k vyduťtí a poté k deformaci. Zamezit se tomu také dá podložením vrtané komponenty vhodným materiálem [1, 19].



Obr. 8 Geometrie a porovnání špičky vrtáků [12]:

a) geometrie vrtáku, b) špička vrtáku pro vrtání kovů, c) špička vrtáku pro vrtání plastů.

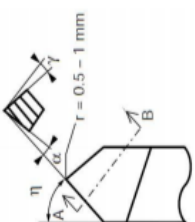

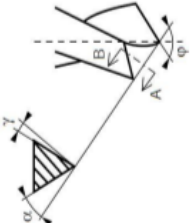
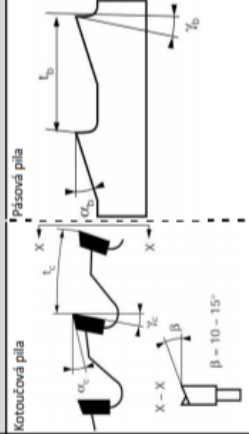
Vyztužené plasty mají při zpracování vyšší zbytkové napětí s nižší rázovou houževnatostí než nevyztužené plasty, a jsou proto obzvláště náchylné k praskání. Pokud je to možné, měly by být před vrtáním předehřáté na teplotu kolem 120 až 150 °C (doba ohřevu přibližně 1 hodina na 10 mm průřez) [9].

Zde jsou shrnuty nejčastější potíže, které vznikají při vrtání plastů a jejich hlavní příčiny [11]:

- zužující se vrtané otvory
 - nesprávně naostřený vrták,
 - malý pracovní záběr,
 - příliš vysoká rychlost posuvu.
- spálený nebo natavený povrch
 - použití nevhodného vrtáku,
 - nesprávně naostřený vrták,
 - nedostatečný posuv,
 - tupý vrták,
 - příliš velké zatížení,
 - velká hloubka bez přísuvu.
- štěpení povrchu
 - nadměrný posuv,
 - nadměrný pracovní záběr,
 - tenká vrstva materiálu.

- chvění v průběhu vrtání
 - nadměrný pracovní záběr,
 - nedostatečný posuv,
 - příliš dlouhý vrták,
 - tenká vrstva materiálu.
- spirálové stopy, stopy posuvu na vnitřním průměru
 - příliš vysoká rychlost posuvu,
 - vrták není vycentrovaný,
 - špička vrtáku není uprostřed.
- předimenzované otvory
 - špička vrtáku není uprostřed,
 - nedostatečný pracovní záběr,
 - příliš vysoká rychlost posuvu,
 - příliš velký úhel ostří.
- poddimenzované otvory
 - tupý vrták,
 - nadměrný pracovní záběr,
 - příliš malý úhel ostří.
- nesoustředné vrtané otvory
 - příliš vysoká rychlost posuvu,
 - nízké otáčky vřetene,
 - velká hloubka bez přísuvu,
 - vrták není správně naostřený,
 - vrták upnutý ve středu.
- tvorba otřepů při vysunutí
 - tupé řezné nástroje.
- rychlé otupení vrtáku
 - příliš nízký posuv,
 - nízké otáčky vřetene,
 - nedostatečné mazání v důsledku chlazení.

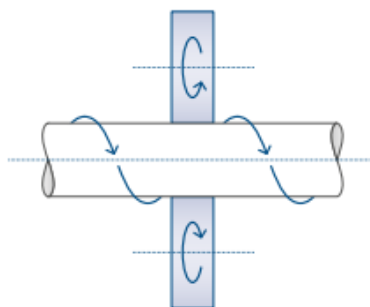
Zde jsou uvedeny řezné podmínky soustružení, frézování, vrtání a řezání pro několik běžně používaných plastových materiálů.

Tabulka geometrie nástrojů, rychlostí a posuvů pro řezání, soustružení, frézování a vrtání																						
	SOUSTRUŽENÍ					FRÉZOVÁNÍ					VRTÁNÍ					ŘEZÁNÍ						
																						
	α	γ	η	f	V	α	γ	f	V	α	γ	ϕ	f	V	α_c	γ_c	β	α_b	γ_b	t_b	V_b	
ERTALON / NYLATRON	5 - 15	0 - 10	0 - 45	0,05 - 0,5	200 - 500	5 - 15	0 - 15	<0,05	200 - 500	10 - 15	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 100	10 - 15	0 - 15	8 - 45		25 - 40	0 - 8	4 - 10	50 - 500
TIVAR	5 - 15	0 - 10	0 - 45	0,05 - 0,5	200 - 500	5 - 15	0 - 15	<0,05	200 - 500	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 100	10 - 15	0 - 15	8 - 45		25 - 40	0 - 8	4 - 10	50 - 500
SYMALIT PVDF	5 - 15	0 - 10	0 - 45	0,05 - 0,5	200 - 500	5 - 15	0 - 15	<0,05	200 - 500	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 100	10 - 15	0 - 15	8 - 45		25 - 40	0 - 8	4 - 10	50 - 500
ERTACETAL	5 - 15	0 - 10	0 - 45	0,05 - 0,5	200 - 500	5 - 15	0 - 15	<0,05	200 - 500	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 100	10 - 15	0 - 15	8 - 45		25 - 40	0 - 8	4 - 10	50 - 500
SEMITRON ESD 225	5 - 15	0 - 10	0 - 45	0,05 - 0,5	200 - 500	5 - 15	0 - 15	<0,05	200 - 500	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 100	10 - 15	0 - 15	8 - 45		25 - 40	0 - 8	4 - 10	50 - 500
ERTALYTE	5 - 15	0 - 10	0 - 45	0,05 - 0,5	200 - 400	5 - 15	0 - 15	<0,05	150 - 300	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 80	10 - 15	0 - 15	8 - 25		25 - 40	0 - 8	4 - 10	50 - 400
DURATRON T4203 PAI	5 - 15	0 - 10	0 - 45	0,05 - 0,5	200 - 400	5 - 15	0 - 15	<0,05	200 - 400	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 100	10 - 15	0 - 15	8 - 25	1.000 - 1.000	25 - 40	0 - 8	4 - 10	50 - 400
KETRON PEEK-1000	5 - 15	0 - 10	0 - 45	0,05 - 0,5	200 - 400	5 - 15	0 - 15	<0,05	200 - 400	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 100	10 - 15	0 - 15	8 - 25		25 - 40	0 - 8	4 - 10	50 - 400
PC 1000	5 - 15	0 - 10	0 - 45	0,05 - 0,5	200 - 400	5 - 15	0 - 15	<0,05	200 - 400	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 100	10 - 15	0 - 15	8 - 25		25 - 40	0 - 8	4 - 10	50 - 400
PPSU 1000	5 - 15	0 - 10	0 - 45	0,05 - 0,5	200 - 400	5 - 15	0 - 15	<0,05	200 - 400	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 100	10 - 15	0 - 15	8 - 25		25 - 40	0 - 8	4 - 10	50 - 400
PEI 1000	5 - 15	0 - 10	0 - 45	0,05 - 0,5	200 - 400	5 - 15	0 - 15	<0,05	200 - 400	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 100	10 - 15	0 - 15	8 - 25		25 - 40	0 - 8	4 - 10	50 - 400
PSU 1000	5 - 15	0 - 10	0 - 45	0,05 - 0,5	200 - 400	5 - 15	0 - 15	<0,05	200 - 400	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 100	10 - 15	0 - 15	8 - 25		25 - 40	0 - 8	4 - 10	50 - 400
ERTALON 66-GF30	5 - 15	0 - 10	0 - 45	0,05 - 0,5	100 - 200	5 - 15	0 - 15	<0,05	50 - 150	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 80	10 - 15	0 - 15	8 - 25		25 - 40	0 - 8	4 - 6	50 - 200
DURATRON T4301 PAI / TS530 PAI	5 - 15	0 - 10	0 - 45	0,05 - 0,5	100 - 200	5 - 15	0 - 15	<0,05	50 - 150	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 80	10 - 15	0 - 15	8 - 25		25 - 40	0 - 8	4 - 6	50 - 200
KETRON PEEK-HPV / GF30 / CA30	5 - 15	0 - 10	0 - 45	0,05 - 0,5	100 - 200	5 - 15	0 - 15	<0,05	50 - 150	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 80	10 - 15	0 - 15	8 - 25		25 - 40	0 - 8	4 - 6	50 - 200
TECHTRON HPV PPS	5 - 15	0 - 10	0 - 45	0,05 - 0,5	100 - 200	5 - 15	0 - 15	<0,05	50 - 150	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 80	10 - 15	0 - 15	8 - 25		25 - 40	0 - 8	4 - 6	50 - 200
SEMITRON ESD 410C	5 - 15	0 - 10	0 - 45	0,05 - 0,5	100 - 200	5 - 15	0 - 15	<0,05	50 - 150	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 80	10 - 15	0 - 15	8 - 25		25 - 40	0 - 8	4 - 6	50 - 200
DURATRON PBI	5 - 10	3 - 5	0 - 45	0,05 - 0,5	25 - 100	5 - 15	0 - 15	<0,05	25 - 75	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	25 - 50	10 - 15	0 - 15	8 - 25		25 - 40	0 - 8	2 - 3	25 - 100
FLUORSINT 207 / 500	8 - 12	0 - 5	0 - 45	0,05 - 0,5	150 - 400	5 - 15	0 - 15	<0,05	50 - 150	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 100	10 - 15	0 - 15	8 - 25		25 - 40	0 - 8	4 - 6	50 - 200
SEMITRON ESD 500HR	8 - 12	0 - 5	0 - 45	0,05 - 0,5	150 - 400	5 - 15	0 - 15	<0,05	50 - 150	5 - 10	3 - 5	90 - 120	0,1 - 0,3	50 - 100	10 - 15	0 - 15	8 - 25		25 - 40	0 - 8	4 - 6	50 - 200

Obr. 9 Řezné podmínky pro vybrané materiály [19].

2.7 Broušení plastů

Z důvodu nižších mechanických vlastností plastových materiálů a vysokého silového namáhání při broušení, se nedoporučuje upínat rotační obrobky mezi hroty. V případě dlouhých tyčí a trubek je nejlepších výsledků dosahováno pomocí brusky se dvěma protilehlými kotouči (obr. 10). V závislosti na požadavcích na čistotu finálního povrchu, může být po broušení se dvěma protilehlými kotouči nutné, povrch ještě ultrazvukově vyčistit [18].



Obr. 10 Axiální broušení plastů [11].

Broušení se provádí s kotouči o velké zrnitosti. Z praxe je ověřený např. kotouč z oxidu hlinitého o zrnitosti 46, tvrdosti H8. Vhodné jsou stejné kotouče, jako se používají na dokončovací operace ocelí. Plastové materiály se mohou během broušení natavit a ulpívat na brusném kotouči. Aby se zabránilo velkému zatížení materiálu, je potřeba kotouč pravidelně kontrolovat a v případě potřeby jej očistit [12, 18].

Standardní nastavení používané pro broušení oceli s velkým množstvím toku chladicí kapaliny je u většiny plastů dostačující. Příklad řezných podmínek je uveden v tab. 3 [18].

Tab. 3 Parametry broušení [18].

	Hrubé	Dokončovací
Otáčky vřetene [m/min]	24	12
Příčný posuv [mm]	1,5	0,1 až 1,5
Podélný posuv [mm]	2,5 až 0,4	0,03 až 0,01
Otáčky brousicího kotouče [m/min]	900 až 1200	900 až 1200

2.8 Řezání závitů

Všechny plasty jsou citlivé na vrubové deformace, proto při řezání malých ostrých závitů je velké riziko roztržení materiálu. Ke snížení tendence k roztržení je dobré zkosit hrany otvoru před řezáním závitu. Při závitování se doporučuje vždy používat chladicí kapalinu [10].

Mnoho měkkých materiálů se vlivem tepla při řezání roztáhne a poté vrátí zpět na původní velikost, čímž se závit zdeformuje. Pokud to součást umožňuje, je vhodnější závity frézovat. Nejvhodnější je jednobřitá karbidová destička a závit řezat na několik průjezdů s malým záběrem [10, 11].

Závity je možné řezat i běžnými závitníky na řezání kovů. Tvorbě otřepů lze zabránit použitím závitníku pouze se dvěma drážkami, pro lepší odvod řezaného materiálu. Závitové matice pro vrtání vnějších závitů se nedoporučují, protože by mohly způsobit další řezání při vytahování matice. Při použití závitníků je často vyžadován přídavek na obrábění v závislosti na materiálu a průměru (ze zásady 0,1 mm) [9, 18].

Pokud závit podléhá častému namáhání, je vhodnější použít kovové závitové vložky. V závislosti na tvrdosti materiálu lze vložky do plastové součásti zašroubovat pomocí samořezných prvků nebo využít tepelné roztažnosti plastů a vložky do předeřtáého plastu nalisovat [10].

2.9 Chlazení řezného procesu

Vzhledem k dostatku zkušeností existuje v současné době trend obrábění technických plastů bez použití chlazení. Teplo je odváděno pouze pomocí třísky. Avšak u některých výrobních procesů je chlazení nezbytné, např. při vrtání hlubokých otvorů, řezání závitů nebo obrábění vyztužených materiálů. Chlazení také může pomoci s minimalizací tepelných účinků, které mají vliv na udržení tvarové stability, rozměrové tolerance a zlepšení jakosti povrchu. Chlazení také umožňuje rychlejší posuvy a tím zkrácení pracovního času [1, 3].

Mezi rozšířené způsoby patří chlazení mlhou, kde je chladicí kapalina rozptýlována ve velmi malých kapičkách. Ovšem nejpoužívanější způsob chlazení je stále pomocí proudu kapaliny. Kromě chlazení a mazání napomáhá kapalina i k odstranění třísky z místa řezu [9].

V závislosti na typu materiálu je volena vhodná chladicí kapalina. Lze použít i běžně dostupné obráběcí emulze nebo oleje, avšak ne pro všechny materiály. Zejména amorfni plasty by měly být obráběny za sucha, protože vlhkost vede k jejich praskání. Pokud je použití chladicí kapaliny nutné, je potřeba obráběný komponent ihned po dokončení očistit od chladicí kapaliny. V případě použití chladicí kapaliny se obecně doporučuje kapalina na vodní bázi, aby nedošlo k nežádoucí reakci mezi obráběným plastem a aditivy v kapalině. Některé materiály (např. polyamid nebo nylon) mohou chladicí kapalinu do sebe absorbovat [10, 11, 18].

Pro co nejlepší rozměrové tolerance a jakost povrchu se zásadně využívá chlazení studeným vzduchem nebo vakuové odsávání vzduchu. Tyto metody chlazení zároveň napomáhají k odstraňování třísek z místa řezu. Odsávání nejenže udržuje nástroj chladný, ale i vytváří prostředí bez prachu a zápachu [10, 18].

Absorpce vlhkosti plastů je reverzibilní proces. Obrobené díly, které absorbovaly vlhkost a následně změnily svůj rozměr, mohou být sušeny, aby znovu získaly jejich původní tvar. Sušení se provádí ve vakuové peci. Teplota sušení je specifická pro daný materiál. (např. 60 až 70 °C pro ERTALON® / NYLATRON®, SEMITRON® ESD 225 a 150 °C pro CELAZOLE® PBI z TOTLON® PAI). Doba schnutí zřejmě závisí na obsahu vlhkosti, stejně jako na tloušťce stěny sušené součásti. Obecně se udává minimálně 24 hodin na každé 3 mm tloušťky stěny [19].

2.10 Odstranění otřepů

Po frézování, broušení, vrtání, soustružení nebo gravírování mohou zůstat na obrobku nebo jeho hranách malé kousky zpracovávaného materiálu tzv. otřepy. Otřepy negativně ovlivňuje vzhled a kvalitu povrchu součásti. Při zpracování plastů závisí tvorba otřepů zejména na použitém nástroji a jeho stavu, obráběném materiálu a obráběcích podmínkách. Měkké a houževnaté plasty mají vyšší tendenci k tvorbě otřepů než ty tvrdé. Dále pak vysoká řezná rychlost spolu s vysokým posuvem vedou k vyšším teplotám při obrábění. Teplo způsobí změknutí materiálu a následnou tvorbu otřepu [11].

Vzniklých otřepů při obrábění je možné se zbavit několika způsoby. První a nejjednodušší možnost je otřepy odstranit ručně pomocí speciálních nástrojů. Dále se používá metoda tryskání, kdy proud abrazivního materiálu (písek, skleněné kuličky, soda) jsou pod vysokým tlakem tryskány na povrch obrobku. Tryskání lze zároveň využít i k očištění a uhlazení či zdrsňování povrchu, v závislosti na použitém abrazivu. Otřepy lze také odstranit pomocí brusných a leštících kotoučů. Další metodou je kryogenní odstraňování otřepů. Součásti jsou ochlazeny na teplotu zhruba $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$ a následně omílány v bubnovém rotačním zařízení. Nízká teplota má za následek zkrěhnutí tenkých otřepů a jejich odlomení. Poslední metodou je opálení otřepů pomocí plamene, horkého vzduchu nebo infračerveného záření. V případě plamene je potřeba dát pozor, aby nedošlo k teplotní deformaci obrobku [10, 11].

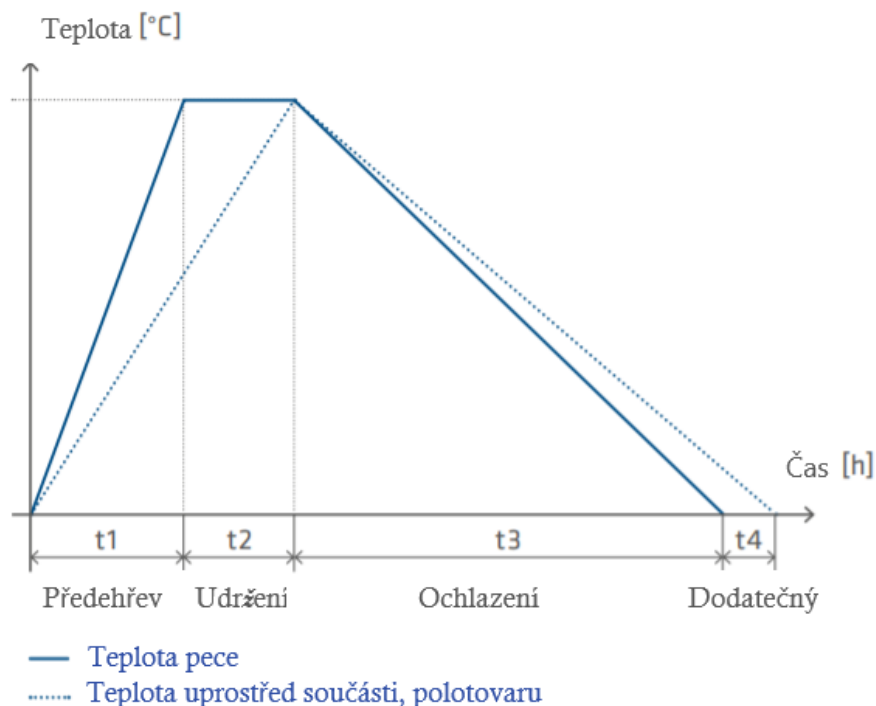
V konečném důsledku nejlepším řešením odstranění otřepů je se jim vyhnout již při výrobě součásti. Takto zvolené operace mohou zabrat o něco více pracovního času, ale celkový výrobní čas se zkrátí o dobu sekundárního dokončování a s ním i související náklady [10].

2.11 Tepelné zpracování

Proces žíhání je tepelné zpracování pro polotovary, vylisky a hotové obrobky. Výrobky se pomalu a rovnoměrně zahřívají na definovanou teplotní hladinu specifickou pro daný materiál. Poté následuje doba udržení, která závisí na tloušťce materiálu, aby se plně zahřál po celém svém objemu. Následně je materiál pomalu a rovnoměrně ochlazován zpět na pokojovou teplotu. Celý proces žíhání je graficky znázorněn na obr. 11. Teploty žíhání pro vybrané materiály jsou uvedeny v tab. 4. V případě plastů se nejčastěji používají dva typy žíhání. Prvním je žíhání ke snížení vnitřního pnutí, druhé se nazývá tzv. přechodné žíhání nebo-li mezižíhání (*intermediate annealing*). Podrobný popis obou typů žíhání je uveden níže. Žíhání se provádí ve speciální peci s recirkulačním vzduchem. Může také probíhat v peci s cirkulujícím inertním plynem např. dusíkem, nebo v olejové lázni [9, 11].

Žíhání ke snížení vnitřního pnutí

Jak již bylo uvedeno, vlivem technologie protlačování vzniká při výrobě polotovarů poměrně silné vnitřní napětí. Proces žíhání pomáhá toto napětí snížit. Výsledkem žíhání je vytvoření rovnoměrné krystalické struktury materiálu a také lepší pevnost a chemická odolnost. Rovněž zvyšuje tvarovou a rozměrovou stabilitu v širokém teplotním rozmezí. Tím je zajištěno, že materiál zůstane tvarově stabilní během procesu obrábění i po něm a bude možné jej snadněji obrábět [9].



Obr. 11 Žihání plastů [9].

Tab. 4 Žihací teploty vybraných materiálů [9].

Materiál	Předehřev (t_1)	Udržení (t_2)	Ochlazení (t_3)
PEEK	3 h na 120 °C, 4 h na 220 °C	1,5 h na cm tloušťky stěny	20 °C / h
PA6	3 h na 90 °C, 6 h na 160 °C	1 h na cm tloušťky stěny	20 °C / h
PA66	3 h na 100 °C, 4 h na 180 °C	1 h na cm tloušťky stěny	20 °C / h
POM – C	3 h na 90 °C, 3 h na 155 °C	1 h na cm tloušťky stěny	20 °C / h
POM – H	3 h na 90 °C, 3 h na 160 °C	1 h na cm tloušťky stěny	20 °C / h
PET	3 h na 100 °C, 4 h na 180 °C	1 h na cm tloušťky stěny	20 °C / h
PC	3 h na 80 °C, 6 h na 130 °C	1 h na cm tloušťky stěny	20 °C / h
PPS	3 h na 120 °C, 4 h na 220 °C	1,5 h na cm tloušťky stěny	20 °C / h
PI	2 h na 160 °C, 6 h na 280 °C	10 h při 280 °C	20 °C / h

Přechodné žihání (mezižihání)

Mezižihání je využíváno při obrábění tzv. kritických komponentů, kde proces obrábění může mít za následek další zvýšení úrovně napětí v obrobku. Využívá se tam, kde jsou vyžadovány přesné tolerance nebo pokud obráběné díly mají tendenci se deformovat vlivem jejich tvaru (asymetrie, omezené průřezy, kapsy, drážky). Mezižihání je tepelné zpracování obrobku mezi jeho hrubovací a dokončovací fází. Při hrubování je zapotřebí ponechat dostatečný přídavek na rozměr, protože žihání může způsobit smrštění součásti.

Veškeré dokončovací operace by proto měly probíhat až po přechodném žíhání. Doporučuje se součást při žíhání patřičně podepřít a upevnit, aby se předešlo nechtěné deformaci [9].

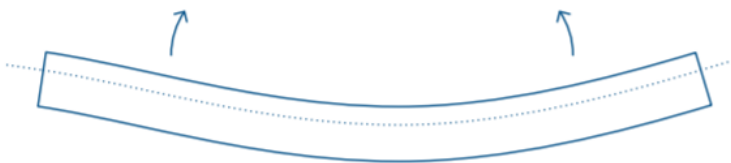
Mezižíhání je vhodné použít i při obrábění vyztužených plastů, kde orientace vláken může zvýšit tendenci k deformaci. Může být také účelné v případě použití tupých nebo nevhodných nástrojů, které jsou příčinou vzniku dalšího vnitřního napětí. Dále také při nadměrném přenosu tepla do součásti, způsobený špatně zvolenými řeznými podmínkami, zejména nevhodnou řeznou a posuvovou rychlostí. Mezižíhání se také používá při odebrání velké části objemu materiálu zejména z jedné strany obrobku. Obrobek má poté tendenci k prohnutí nebo zvrásnění povrchu (obr. 12) [9, 11].

Ukázkové zkroucení materiálu vlivem jednostranného obrábění

1. žlutá = materiál k odebrání



2. deformace způsobená velkým úběrem materiálu z jedné strany



Obr. 12 Deformace obrobku [11].

3 TEXTURA POVRCHU

S rozvojem moderních technologií a výrobních možností jsou v dnešní době konstruovány stále složitější a propracovanější stroje a zařízení, které vyžadují velmi kvalitně vyrobené komponenty. Vysokojakostní komponenty přispívají jak ke správné funkci, tak ke zvýšení životnosti a spolehlivosti. Mezi základní kritéria kvality výroby patří nejen rozměrová a tvarová přesnost, ale také textura povrchu. Na textuře povrchu závisí vlastnosti povrchové vrstvy, které mnohdy ovlivňují funkci vyrobené komponenty. Povrch jako takový lze hodnotit podle jeho tvrdosti, energie povrchu, chemického složení a morfologie. Morfologii povrchu lze rozdělit na úrovně makrostruktury a mikrostruktury. Zatímco mikrostruktura hodnotí samotná zrna či vlákna, vazby mezi nimi, poruchy a pórovitost, makrostruktura hodnotí topografii povrchu [21, 22].

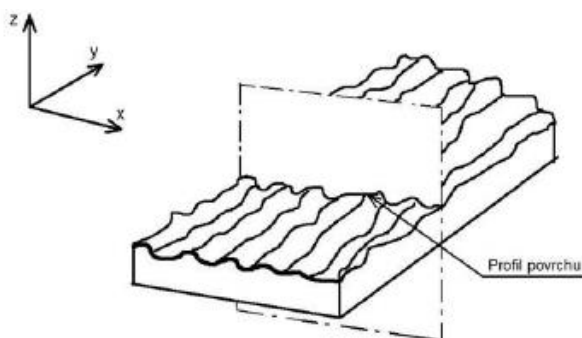
Nejvýznamnějším ukazatelem makrostruktury povrchu a předmětem praktické části této práce je drsnost povrchu.

Pojem drsnost povrchu označuje nerovnosti povrchu, které vznikají při výrobě součástí. Drsnost je ovlivněna technologií a technologickými podmínkami při výrobě. Drsnost povrchu popisuje opakované nebo náhodné úchyly skutečného povrchu (povrch ohraničující těleso od okolí) od ideálního (geometrického) povrchu. Ideální povrch je teoretický dokonalý povrch bez jakýchkoli nerovností. Drsnost povrchu má významný vliv na třecí síly, mazací vlastnosti a náchylnost povrchu ke vzniku trhlin. Vše uvedené má významný vliv na funkční plochy a samotnou funkčnost a životnost součástí [21, 23].

Drsnost povrchu lze popsat pomocí následujících profilových parametrů povrchu, které jsou definovány pomocí normy ČSN EN ISO 4287 [24] „*Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*“, a plošných parametrů povrchu, které definuje norma ČSN EN ISO 25178-2 [25]. „*Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*“.

3.1 2D Profil povrchu

2D profil povrchu je zjednodušený profil, který zobrazuje nerovnosti na povrchu (výstupky a prohlubně) vzniklé vlivem výroby. Profil ve formátu 2D křivky lze získat tak, že se provede kolmý řez základním povrchem (viz obr. 13). Základní povrch má směr skutečného povrchu v místě, kde se provádí vyhodnocování. Takto získaný profil projde filtrací a poté slouží jako zdroj informací pro hodnocení struktury povrchu [23].



Obr. 13 Profil povrchu [21].

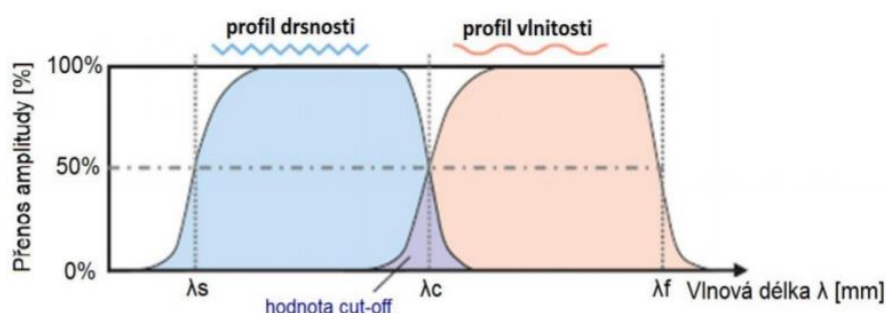
Filtrování 2D profilu

Slouží k filtrování nežádoucích naměřených složek podle mezní vlnové délky cutt-off. Velikost mezní vlnové délky odděluje profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky o stejných přenosových charakteristikách (obr. 14). Používají se celkem tři filtry:

λ_s filtr: určuje přechod mezi drsností a kratšími složkami vlnových délek,

λ_c filtr: určuje přechod mezi složkou drsnosti a vlnitostí,

λ_f filtr: určuje přechod mezi vlnitostí a delšími složkami vlnových délek [26].



Obr. 14 Přenosová charakteristika filtrace povrchu [26].

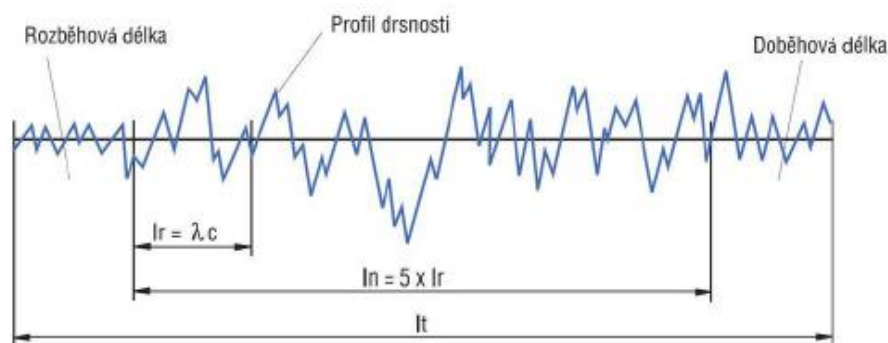
Základní délka l_r

Délka profilové křivky ve směru osy x. Slouží k rozeznání nerovností povrchu. Její délka je totožná s vlnovou délkou λ_c [23].

Vyhodnocovaná délka l_n

Slouží k vyhodnocení povrchu. Zpravidla je složena z pěti délek základních. S vyšším počtem roste spolehlivost měřených parametrů [23].

Celková délka profilu je označena l_t a je složena z délky rozběhové, délky vyhodnocované a délky doběhové. Všechny tyto délky jsou zobrazeny na obr. 15.



Obr. 15 Délky profilu [27].

Základní profil (P – profil)

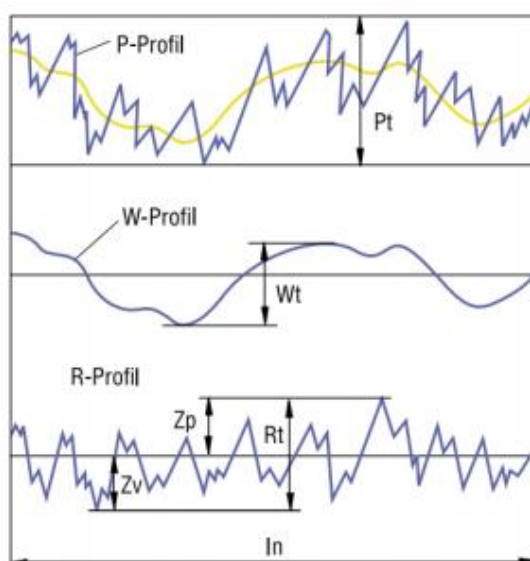
Základní profil pro hodnocení parametrů lze získat oddělením krátkovlnné složky filtrem λ_s (viz obr. 16) [23].

Profil drsnosti (R – profil)

Lze získat ze základního profilu oddělením vlnové složky filtrem λ_c . Slouží k vyhodnocování parametrů drsnosti (viz obr. 16) [23].

Profil vlnitosti (W – profil)

Lze získat ze základního profilu oddělením vlnových složek filtrem λ_c a filtrem λ_f . Slouží k vyhodnocování parametrů vlnitosti (viz obr. 16) [23].



Obr. 16 Profily povrchu [27].

Takto získané profily se popisují pomocí výškových, délkových a tvarových parametrů, které souhrnně hodnotí prvky profilu. Prvkem profilu se rozumí výstupek či prohlubeň profilu od její střední hodnoty [24].

3.2 Vybrané parametry profilu drsnosti

K popisu bylo vybráno několik parametrů s ohledem na praktickou část této práce.

Největší výška výstupku profilu drsnosti (Rp)

Parametr určující nejvyšší hodnotu výšky výstupku (Z_p) na základní délce [24].

Největší hloubka prohlubně profilu drsnosti (Rv)

Parametr určující nejvyšší hodnotu hloubky prohlubně (Z_v) na základní délce [24].

Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti (R_a)

Jedná se o nejrozšířenější parametr hodnotící drsnost povrchu. Tento parametr popisuje aritmetický průměr absolutních hodnot výšek prvků profilu (Z_p a Z_v) v daném rozsahu základní délky (l_r). Nevypovídá o přesné drsnosti povrchu, protože nezahrnuje extrémy měřeného profilu. Průměrná aritmetická úchylka profilu je popsána vztahem (1) [24].

$$R_a = \frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad [\mu\text{m}] \quad (1)$$

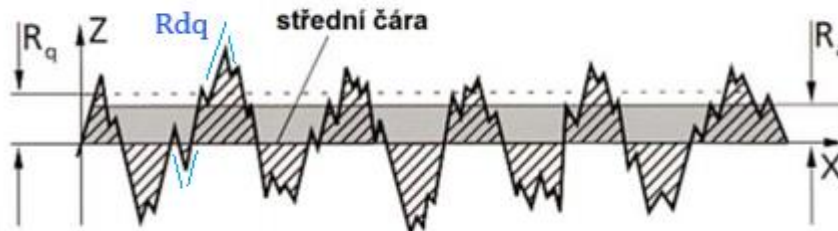
$Z(x)$ – výška posuzovaného prvku v bodě x [μm],

l_r – základní délka profilu [mm].

Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti (R_q)

Tento parametr je velmi podobný předchozímu parametru R_a , pouze s tím rozdílem, že popisuje kvadratický průměr absolutních hodnot výšek prvků profilu, a proto je citlivější. Je vhodný pro hodnocení velmi jemných povrchů. Oba parametry jsou zobrazeny na obr. 17. Průměrná kvadratická úchylka profilu je popsána vztahem (2) [24].

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |Z^2(x)| dx} \quad [\mu\text{m}] \quad (2)$$



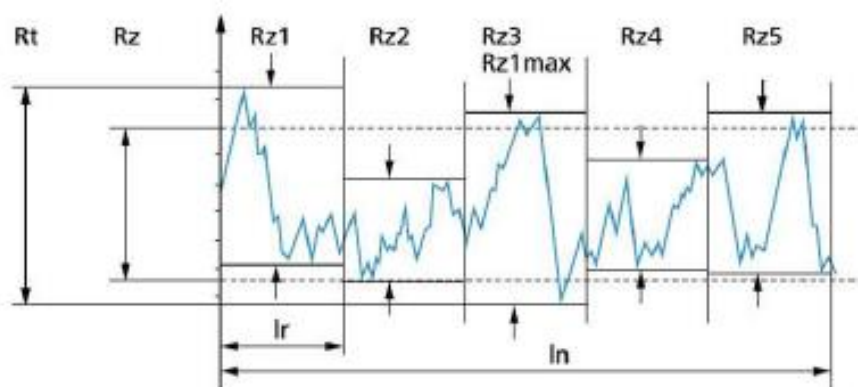
Obr. 17 Znáznornění parametrů R_a a R_q [28].

Největší výška profilu drsnosti (R_z)

Tento parametr popisuje součet absolutních hodnot nejvyšší výšky výstupku (Z_p) a nejhlubší prohlubně (Z_v) na základní délce. Je vhodný pro posuzování těsnících vlastností [24].

Celková výška profilu drsnosti (R_t)

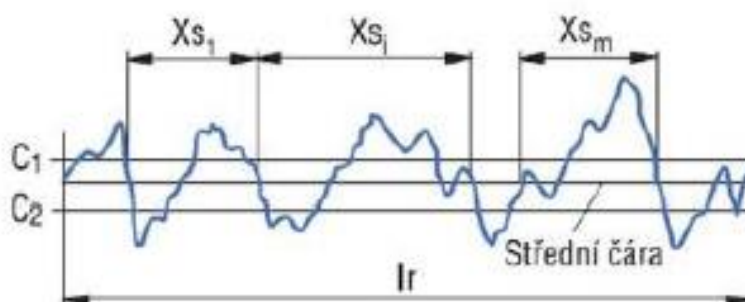
Tento parametr popisuje součet absolutních hodnot výšek nejvyššího výstupku (Z_p) a nejhlubší prohlubně (Z_v) na celé vyhodnocované délce. V důsledku hodnocení celé délky profilu je tento parametr více citlivý na rušivé vlivy povrchu (např. nečistoty a rýhy) než parametr R_z . Oba tyto parametry jsou vykresleny na obr. 18. Je významný při posuzování oblastí povrchu náchylných k trhlinám. Čím je jeho hodnota vyšší, tím je daná oblast náchylnější ke vzniku trhliny [24].



Obr. 18 Znázornění parametrů Rz a Rt [27].

Průměrná šířka prvku profilu drsnosti (R_{Sm})

Jedná se o délkový parametr, který popisuje aritmetický průměr šířek (X_s) prvků profilu v rozsahu základní délky (viz obr. 19) [24].



Obr. 19 Znázornění šířky prvků profilu [27].

Průměrný kvadratický sklon profilu drsnosti (R_{dq})

Jedná se o tvarový parametr, který je definován jako kvadratický průměr sklonů pořadnic (dZ/dx) v rozsahu základní délky l_r (viz obr. 17). S rostoucím sklonem roste tření, povrch je méně odrazivý a má větší tendenci k deformaci [24].

Základní hloubka jádra profilu drsnosti (R_k)

Parametr popisující základní hloubku jádra profilu drsnosti. Jádrem se rozumí zóna s největším nárůstem podílu materiálu nad určitou hladinu (viz obr. 20) [27].

Redukovaná výška vrcholů profilu drsnosti (R_{pk})

Parametr popisující střední výšku špiček výstupků profilu, které vyčnívají z jádra profilu drsnosti (viz obr. 20) [27].

Redukovaná hloubka prohlubní profilu drsnosti (R_{vk})

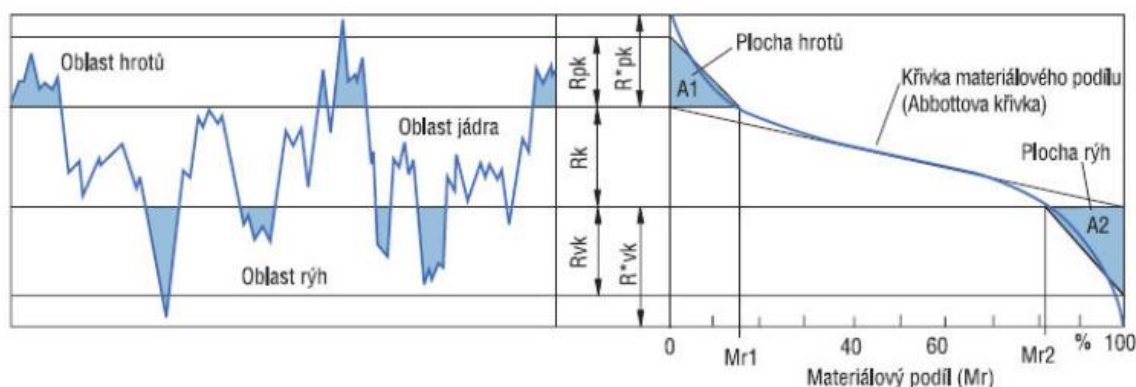
Parametr popisující střední hloubku prohlubní profilu, které zasahují z jádra profilu drsnosti do materiálu (viz obr. 20) [27].

Podíl materiálu nad jádrem profilu drsnosti (Mr_1)

Je udáván v procentech. Vymezuje jádro profilu drsnosti ke straně bez materiálu. (viz obr. 20) [27].

Podíl materiálu pod jádrem profilu drsnosti (Mr_2)

Je udáván v procentech. Vymezuje jádro profilu drsnosti ke straně materiálu. (viz obr. 20) [27].



Obr. 20 Znázornění parametrů R_k , R_{pk} a R_{vk} [27].

3.3 3D profil povrchu

3D profil povrchu slouží k hodnocení plošných parametrů textury povrchu. Tyto parametry jsou definovány normou ČSN EN ISO 25178-2. Plošné profily rozlišují hodnocené parametry na dvě skupiny. Na parametry pole, které se stanovují ze všech bodů povrchu a na parametry prvku, které hodnotí předem dané topografické podmnožiny prvků povrchu. Základní topografické prvky jsou dle normy rozděleny a popsány následovně [25]:

- bodové:
 - výstupek – nejvyšší bod na sledovaném povrchu,
 - prohlubeň – nejnižší bod na sledovaném povrchu,
 - bod sedla – konkrétní bod měřeného sedla,
 - sedlo – sada bodů na povrchu, kde dochází ke křížení hřebenové a kurzové přímky.
- čárové:
 - kurzová přímka – křivka oddělující přilehlé vrcholy,
 - hřebenová přímka – křivka oddělující přilehlá údolí.
- plošné:
 - vrchol – oblast v okolí výstupku,
 - údolí – oblast okolo prohlubně.

Filtrování 3D profilu

Obdobně jako v případě 2D profilu je potřeba pomocí filtrů jednotlivé struktury povrchu od sebe oddělit a odstranit rušivé jevy. Základem pro hodnocení povrchu je správné použití nastavení filtrů. Filtrace je znázorněna na obr. 21.

S – filtr (Gaussův)

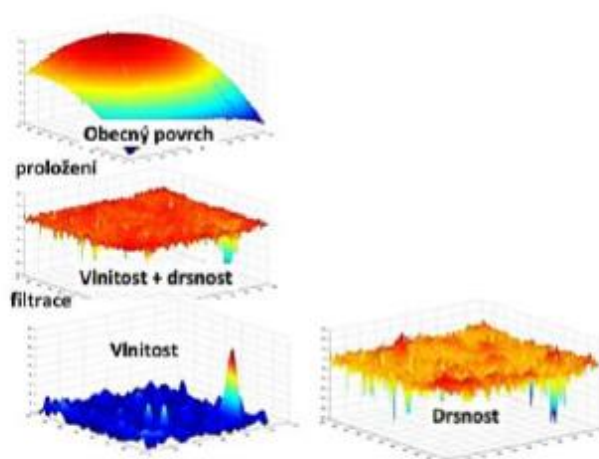
Používá se v prvním kroku. Slouží k filtraci prvků s velice krátkou vlnovou délkou. Po aplikaci tohoto filtru lze získat tzv. primární povrch.

F – filtr

Je založen na metodě nejmenších čtverců. Slouží k vyřazení vlivu tvaru z primárního povrchu a následně vytváří tzv. S – F povrch.

L – filtr

Slouží k filtraci prvků s dlouhou vlnovou délkou. Aplikuje se buď přímo na primární povrch, nebo až na S – L povrch. Následně vytváří tzv. S – L povrch [25].



Obr. 21 Filtrace 3D profilu [25].

3.4 Vybrané plošné parametry drsnosti povrchu

K popisu bylo vybráno několik plošných parametrů s ohledem na praktickou část této práce. Tyto parametry jsou plošnou obdobou parametrů R – profilu z kapitoly 3.2.

Maximální výška vrcholu omezené stupnice povrchu (S_p)

Parametr určující nejvyšší hodnotu výšky vrcholu uvnitř zvolené plochy [25].

Maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu (S_v)

Parametr určující nejvyšší hodnotu hloubky prohlubně uvnitř zvolené plochy zmenšenou o její nejmenší hodnotu [25].

Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu (Sa)

Parametr popisuje aritmetický průměr absolutních hodnot koordinace uvnitř zvolené plochy. Uplatňuje se především na obrobené povrchy. Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu je popsán vztahem (3) [25].

$$Sa = \frac{1}{A} \cdot \iint_A |Z(x, y)| dx dy \quad [\mu\text{m}] \quad (3)$$

$Z(x, y)$ – výšková souřadnice posuzovaného prvku [μm],

A – hodnocená plocha [mm^2].

Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu (Sq)

Parametr vymezuje průměrné hodnoty čtverce hodnot koordinace uvnitř zvolené plochy. Zohledňuje větší význam jednotlivých prvků profilu než parametr Sa. Uplatňuje se spíše na optické plochy. Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu je popsán vztahem (4) [25].

$$Sq = \frac{1}{A} \cdot \sqrt{\iint_A |Z^2(x, y)| dx dy} \quad [\mu\text{m}] \quad (4)$$

Maximální výška omezené stupnice povrchu (Sz)

Tento parametr popisuje součet absolutních hodnot nejvyšší výšky vrcholu (Sp) a nejhlubší prohlubně (Sv) uvnitř zvolené plochy. Vhodný pro hodnocení třecích a těsnících vlastností povrchu [25].

Základní hloubka jádra drsnosti omezené stupnice povrchu (Sk)

Parametr popisující hloubku jádra drsnosti měřené plochy (zónu s největším nárůstem podílu materiálu nad určitou hladinu) [25].

Redukovaná výška vrcholů omezené stupnice povrchu (Spk)

Parametr popisující střední výšku špiček výstupků měřené plochy, které vyčnívají z jádra drsnosti [25].

Redukovaná hloubka údolí omezené stupnice povrchu (Svk)

Parametr popisující střední hloubku špiček prohlubní měřené plochy, které zasahují z jádra drsnosti do materiálu [25].

Podíl materiálu nad jádrem drsnosti omezené stupnice povrchu (Sr1)

Je udáván v procentech. Vymezuje jádro drsnosti omezené stupnice povrchu ke straně bez materiálu [25].

Podíl materiálu pod jádrem drsnosti omezené stupnice povrchu (Sr2)

Je udáván v procentech. Vymezuje jádro drsnosti omezené stupnice povrchu ke straně materiálu [25].

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Cílem experimentální části této práce bylo porovnání a vyhodnocení vlivu konvenčních způsobů třískového obrábění na texturu povrchu funkčních ploch u vybraných technických plastů. Zkušební vzorky byly připraveny různými technologiemi třískového obrábění, a to soustružením, frézováním, broušením a leštěním. Technologické podmínky všech způsobů obrábění byly přizpůsobeny k dosažení přibližně stejných hodnot konečné drsnosti povrchu. Práce rovněž pojednává o vlivu chlazení při obrábění plastových materiálů. Vzorky byly připraveny ze čtyř odlišných plastových materiálů, a to Ertalon 6SA, Ketron Peek – 1000, Ertacetal C a Tivar 1000. Charakteristické vlastnosti jednotlivých materiálů jsou uvedeny v (kap. 4.1). Jednotlivé technologie třískového obrábění byly porovnány vzájemně mezi sebou pro každý materiál. Z analýzy naměřených dat byly vzorky hodnoceny na základě vybraných profilových a plošných parametrů v souvislosti s přínosem pro praxi. Práce rovněž pojednává o zhodnocení vhodnosti zvolených parametrů obrábění na výslednou texturu obrobených povrchů zkušebních vzorků.

4.1 Charakteristiky testovaných materiálů

Pro experimentální část této práce byly vybrány čtyři poměrně odlišné materiály ze skupiny technických termoplastů se semikrystalickou strukturou. Všechny testované materiály byly zakoupeny u firmy Mitsubishi Chemical Advanced Materials. Jednotlivé plasty se od sebe liší jak svými tepelnými, mechanickými, chemickými a elektrickými vlastnostmi, tak i způsobem jejich využití. Zde je uvedena stručná charakteristika jednotlivých materiálů.

Tivar 1000

Tivar 1000 je materiál z polyetylenu s ultra vysokou molekulovou hmotností (PE – UHMW) přírodně bílé barvy. Ve srovnání s ostatními technickými plasty disponuje velmi nízkou měrnou hmotností a řadí se do skupiny běžných plastů. Tento materiál se vyznačuje vysokou odolností proti otěru a vysokou rázovou houževnatostí i za velmi nízkých teplot. Je odolný proti chemickému působení a absorpci vody. Dobře se obrábí, je samomazný a jeho povrch má velmi nízké tření. Zachovává si své vlastnosti, až do teploty -200 °C. Využívá se ve všeobecném strojírenství, potravinářském, chemickém, textilním a automobilním průmyslu. Oproti ostatním testovaným materiálům je výrazně měkčí a disponuje nejnižší maximální pracovní teplotou. Vybrané vlastnosti v porovnání s ostatními testovanými materiály jsou shrnuty v tab. 5 [29, 30].

Ertacetal C

Ertacetal C neboli polyoximetylen (POM – C) je termoplastický polymer patřící mezi čisté acetalové kopolymery. Řadí se mezi konstrukční plasty. Jeho přírodní barva je mléčně bílá. Je vysoce odolný vůči hydrolýze, silným zásadám a tepelně – oxidační degradaci. Tento materiál má vysokou mechanickou pevnost a tvrdost, velmi dobrou rozměrovou stálost, odolnost proti tečení a dobré kluzné vlastnosti. Velmi dobře se obrábí a je vhodný pro výrobu přesných mechanických součástí (např. ozubená kola s malým modulem). Pro jeho nenásákavost může být použit pro výrobu součástí pracujících ve vodě. Ertacetal C je lehce omyvatelný a fyziologicky netečný, proto je vhodný i pro potravinářský průmysl. Jeho vybrané vlastnosti jsou uvedeny v tab. 5 [31, 32].

Ertalon 6SA

Ertalon 6SA je označení materiálu s polyamidovými vlákny šesté třídy (PA 6). Polyamidové materiály jsou běžně nazývány také jako nylony. Tento materiál patří mezi konstrukční plasty. Kombinuje vysokou pevnost, tuhost, tvrdost a houževnatost s dobrou odolností proti ořezu a tlumícími schopnostmi. Je odolný proti tečení a stárnutí za tepla. Ertalon 6SA má dobré elektroizolační vlastnosti a chemickou odolnost. Současně je velmi dobře obrobitelný. Všechny tyto vlastnosti dělají tento materiál univerzálně použitelný v oblasti konstrukce i údržby. Součásti z tohoto materiálu mají dobré kluzné vlastnosti, vysokou mez únavy a schopnost pracovat pod vysokým zatížením. Používá se pro výrobu např. trubkových a kluzných ložisek, válce pro dopravníky, ložisková pouzdra, tlumiče, berany bucharů, těsnící kroužky, řetězová kola atd. Vybrané vlastnosti jsou uvedeny v tab. 5 [33, 34].

Ketron – Peek 1000

Ketron Peek 1000 je označení semikrystalického polymeru z čisté polyetherketonové pryskyřice (PEEK). Díky svým vlastnostem patří mezi tzv. pokročilé plastové materiály (*high – tech*). Tento materiál disponuje velmi vysokými mechanickými vlastnostmi a je odolný vůči teplotním, chemickým a radiačním podmínkám. Díky své možné vysoké provozní teplotě (až 310 °C), rozměrové stabilitě, odolnosti proti tečení a vysoké mechanické pevnosti i při zvýšených teplotách, nachází tento materiál využití v mnoha specifických průmyslových odvětvích. Používá se v jaderné energetice, automobilovém, leteckém, kosmickém, či chemickém průmyslu. Z tohoto materiálu se vyrábí např. součásti čerpadel, ozubená kola, sedla ventilů nebo ložiska atd. [35, 36].

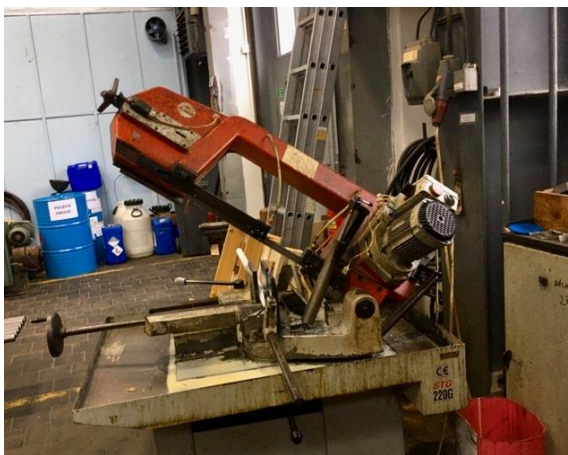
Tab. 5 Vybrané vlastnosti testovaných materiálů [37, 38, 39, 40].

Vlastnosti Materiál	Tivar 1000	Ertacetal C	Ertalon 6SA	Ktr. Peek 1000
Hustota [g/cm ³]	0,93	1,41	1,14	1,31
Teplota tání [°C]	135	165	220	343
Max. provoz. teplota krátkodobá [°C]	130	140	160	310
Max. provoz. teplota dlouhodobá [°C]	80	100	85	250
Min. provoz. teplota [°C]	-200	-50	-40	-60
Mez kluzu [MPa]	20	67	80	110
Tvrdost (metoda kuličkou) [N/mm ²]	33	150	170	230
Modul pružnosti v tahu [MPa]	680	2800	3200	4000

4.2 Použité stroje

Pásová pila Bomar STG 220 G

Dělení plastových tyčí na jednotlivé vzorky proběhlo na pásové pile Bomar STG 220 G od českého výrobce Bomar (viz obr. 22). Technické parametry stroje jsou uvedeny v tab. 6.



Obr. 22 Bomar STG 220 G.

Tab. 6 Technické parametry pily Bomar STG 220 G [41].

Parametr	Hodnota
Rozměry stroje (d, š, v)	1370 x 900 x 1360 [mm]
Hmotnost stroje	304 [kg]
Rozměry pásu (d, š, v)	2710 x 0,9 x 27 [mm]
Řezná rychlost	28 až 56 [m/min]
Prořez	220 [mm]
Celkový příkon stroje	0,99 [kW]
Nádrž chlad. kapaliny	20 [l]
Natočení řezu	až 60 [°]

Frézka FV 25 CNC A

Frézování vzorků proběhlo na frézce FV 25 CNC A od výrobce TOS Olomouc (viz obr. 23). Technické parametry stroje jsou uvedeny v tab. 7.



Obr. 23 FV25 CNC A.

Tab. 7 Technické parametry frézky FV25 CNC A [42].

Parametr	Hodnota
Rozměry stroje (d, š, v)	2750 x 2600 x 2030 [mm]
Hmotnost stroje	1700 [kg]
Pojezdy v ose x, y, z	760 / 355 / 152 [mm]
Rozměry pracovního stolu	1300 x 350 [mm]
Max. zatížení stolu	200 [kg]
Příkon stroje	5,5 [kW]
Max. otáčky vřetene	6000 [min ⁻¹]
Posuvová rychlost	2,5 až 2500 [mm/min]
Rychloposuv	7000 [mm/min]
Řídicí systém	Heidenhain TNC 530

Soustruh SV 18 RD

Pro soustružení vzorků byl použit soustruh SV 18 RD od výrobce TOS Trenčín (viz obr. 24). Technické parametry stroje jsou uvedeny v tab. 8.



Obr. 24 Soustruh SV 18 RD.

Tab. 8 Technické parametry soustruhu SV 18 RD [43].

Parametr	Hodnota
Rozměry stroje (d, š, v)	3200 x 950 x 1600 [mm]
Hmotnost stroje	2000 [kg]
Max. délka obrobku	750 [mm]
Max. průměr obrobku nad ložem	380 [mm]
Max. průměr obrobku nad suportem	215 [mm]
Max. hmotnost obrobku	300 [kg]
Výkon vřetene	6 [kW]
Max. otáčky vřetene	2800 [min ⁻¹]
Posuv podélný	0,02 až 5,6 [mm/ot]
Posuv příčný	0,01 až 2,8 [mm/ot]

Bruska Kellenberger KEL-VISTA UR 175/1000

Broušení vzorků proběhlo na CNC hrotové brusce Kellenberger KEL-VISTA UR 175/1000 (viz obr. 25). Technické parametry stroje jsou uvedeny v tab. 9.



Obr. 25 Kellenberger KEL-VISTA UR 175/1000 [44].

Tab. 9 Technické parametry brusky KEL-VISTA UR 175/1000 [45].

Parametr	Hodnota
Rozměry stroje (d, š, v)	3300 x 2000 x 2000 [mm]
Hmotnost stroje	3500 [kg]
Max. délka obrobku	1000 [mm]
Max. průměr obrobku	350 [mm]
Max. zátěž obrobku	100 [kg]
Řídicí systém	Heidenhain CNC 1830
Celkový příkon stroje	5 [kW]
Max. otáčky brousícího vřetene	2200 [min ⁻¹]
Max. otáčky vřetene sklíčidla	800 [min ⁻¹]
Max. průměr brusného kotouče	400 [mm]

Leštička Struers LaboPol 60

Leštění vzorků proběhlo na leštičce Struers LaboPol 60 od firmy Struers (viz obr. 26). Technické parametry stroje jsou uvedeny v tab. 10.



Obr. 26 Leštička Struers LaboPol 60.

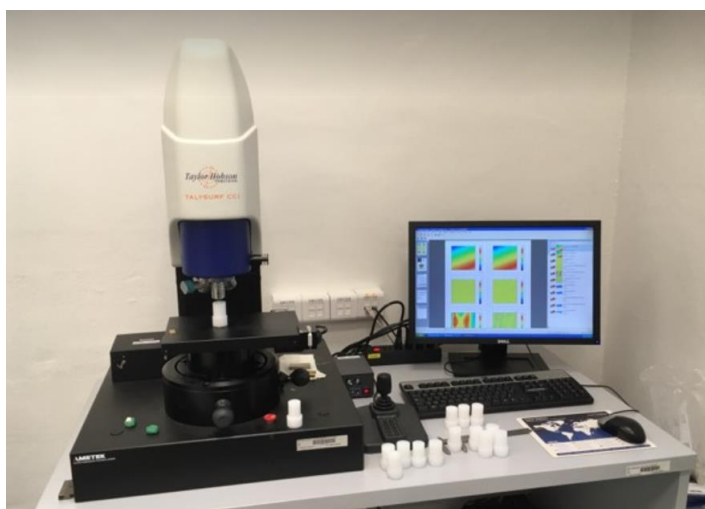
Tab. 10 Technické parametry leštičky Struers LaboPol 60 [46].

Parametr	Hodnota
Rozměry stroje (d, š, v)	950 x 775 x 250 [mm]
Hmotnost stroje	50 [kg]
Průměr disku	300 [mm]
Otáčky disku	50 až 500 [min ⁻¹]
Příkon	750 [W]
Tlak chladicí kapaliny	1 až 10 [bar]
Nádrž chladicí kapaliny	50 [l]

4.3 Použité měřicí přístroje

Talysurf CCI Lite

Pro vyhodnocení textury povrchu obrobených vzorků byl použit přístroj Talysurf CCI Lite (viz obr. 27) od výrobce Taylor Hobson. Jedná se o 3D bezdotykový koherenční korelační interferometr s optickým snímačem. Tímto přístrojem je možné měřit celou řadu typů povrchů, včetně povrchů leštěných, zakřivených nebo stupňovitých. Součástí tohoto zařízení je software TalyMap Platinum, který analyzuje a vyhodnocuje naměřená data. Technické parametry přístroje jsou uvedeny v tab. 11.



Obr. 27 Talysurf CCI Lite.

Tab. 11 Technické parametry Talysurf CLI 1000 [47].

Parametr	Hodnota
Vertikální rozsah	2,2 [mm]
Vertikální rozlišení	0,01 [nm]
Opakovatelnost RMS povrchu	0,02 [nm]
Šum	0,08 [nm]
Max. měřená plocha	6,6 [mm]
Počet měřených bodů	1024 x 1024
Optické rozlišení	0,4 až 0,6 [μm]
Odrazivost povrchu	0,3 až 100 [%]
Rychlost měření	40 až 50 [s]

Olympus DSX500

Grafická dokumentace detailů povrchů byla provedena na invertovaném opto-digitálním metalografickém mikroskopu Olympus DSX500 (viz obr. 28). Tento mikroskop disponuje pěti zobrazovacími módy k pozorování struktur a mikroskopických veličin. Technické parametry přístroje jsou uvedeny v tab. 12.



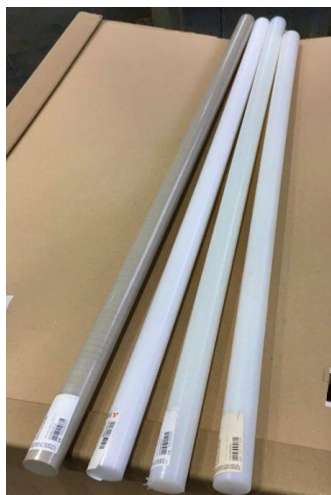
Obr. 28 Olympus DSX500.

Tab. 12 Technické parametry Talysurf CLI 1000 [48].

Parametr	Hodnota
Rozměry stroje (d, š, v)	417 x 278 x 296 [mm]
Měřicí prostor	50 x 50 x 35 [mm]
Zátěžová kapacita	1 [kg]
Přiblížení	14x optické, 30x digitální
Rozlišení	0,01 [μm]
Zvětšení	až 9000x
Přesnost zvětšení	± 3 [%]
Obrazový snímač	2,1 [Mpx]
Osvětlení	LED

4.4 Příprava vzorků

Zkušební vzorky byly zhotoveny ze čtyř tyčových polotovarů o průměru 30 mm a délce 1000 mm (obr. 29). Skutečné rozměry tyčí se od sebe lišily. Tyče byly v řádu desítek milimetrů delší a průměr tyčí se pohyboval v toleranci $\pm 0,1$ až $0,5$ mm oproti udávanému rozměru prodejce. Každá tyč byla nadělena pomocí pásové pily (viz kap. 4.2) na 20 kusů vzorků o průměru 30 mm a délce 50 mm. Na obr. 30 lze vidět nařezané vzorky od každého materiálu. Celkem tedy bylo nařezáno 80 kusů vzorků, které se dále obráběly různými technologiemi třískového obrábění (soustružení, frézování, vrtání, broušení, leštění). Obrábění probíhalo vždy po pěti kusech od každého materiálu pro danou technologii. Technologické podmínky všech způsobů obrábění byly přizpůsobeny k dosažení přibližně stejných hodnot konečné drsnosti povrchu. Řezné podmínky v následujících operacích byly určeny podle parametrů zjištěných z teorie (obr. 9) a možností použitých strojů.



Obr. 29 Polotovary.



Obr. 30 Nařezané vzorky.

Velká část přípravy vzorků (dělení, soustružení a frézování) proběhla v dílnách FSI VUT v Brně. Broušení vzorků proběhlo v soukromém podniku Plastic Parts & Technologies v Moravské Třebové. Leštění vzorků bylo uskutečněno v laboratoři Univerzity Obrany v Brně.

Soustružení vzorků

Soustružení proběhlo na klasickém soustruhu SV 18 RD (viz kap. 4.2). Vzorky byly upnuty do sklíčidla a podélně soustruženy v délce 30 mm. K obrábění byl použit nůž z rychlořezné oceli (HSS) s utvařecem třísky. Nůž byl před obráběním naostřen a na noži byl vybroušen malý rádius pro lepší kvalitu obrobeneho povrchu (dle teorie). Veškeré soustružení probíhalo bez chlazení. Parametry soustružení jsou uvedeny v tab. 13. Za těchto podmínek bylo obrobena vždy pět vzorků od každého materiálu.

Tab. 13 Parametry soustružení.

Vzorek	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Řezná rychlost (v _c) [m/min]	Posuv (f) [mm/ot]	Pracovní záběr (a _p) [mm]
1.	2100	198	0,05	2
2.	2300	217	0,05	2
3.	2450	231	0,05	2
4.	2600	245	0,05	2
5.	2700	255	0,05	2

Navzdory tomu, že byl použit soustružnický nůž s utvařečem třísky, nedocházelo k jejímu odlamování a tvořila se dlouhá souvislá tříska. Tříska se namotávala na nůž a samotný obrobek, zejména u nejtvrďšího z materiálů Ketron Peek 1000, který je vyztužen vlákny (obr. 31). U pár vzorků došlo k natavení a spečení třísky v místě upnutí obrobku, vlivem tření nahromaděné třísky o sklíčidlo (obr. 32).



Obr. 31 Souvislá tříska.



Obr. 32 Spečená tříska.

Frézování vzorků

Frézování vzorků proběhlo na frézce FV 25 CNC A (viz kap. 4.2). K obrábění byla použita válcová čelní fréza se dvěma břity z rychlořezné oceli legované kobaltem (HSS Co8) o průměru 20 mm. Vzorky byly upnuty do svěráku a na dva průjezdy frézy byla po obvodu vyfrézována plocha v délce 30 mm. Frézování probíhalo bez chlazení. Poté byl vzorek otočen a na protější straně byla vyfrézovaná za stejných řezných podmínek druhá plocha za použití chlazení. Parametry frézování jsou uvedeny v tab. 14. Za těchto podmínek bylo obrobena vždy pět vzorků od každého materiálu. Na rozdíl od soustružení, při frézování vznikala u všech vzorků drobná tříska. U některých vzorků došlo k tvorbě otřepů při výjezdu frézy z materiálu (obr. 33).



Obr. 33 Tvorba otřepů.

Tab. 14 Parametry frézování.

Vzorek	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Řezná rychlost (v _c) [m/min]	Posuv (f) [mm/ot]	Pracovní záběr (a _p) [mm]
1.	3200	201	0,05	3
2.	3425	217	0,05	3
3.	3650	229	0,05	3
4.	3900	245	0,05	3
5.	4100	258	0,05	3

Broušení vzorků

Broušení vzorků proběhlo na CNC brusce Kellenberger KEL-VISTA UR 175/1000 (viz kap. 4.2). Vzorky byly upnuty do sklíčidla a podélně broušeny do kulata v délce 30 mm na průměr 29 mm. K broušení byl použit brusný kotouč od firmy Norton o průměru 400 mm, šířce 50 mm se střední zrnitostí ($P = 60$). Brusný kotouč během celého procesu vykonával axiální kmitavý pohyb s frekvencí 90 mm/min. Veškeré broušení probíhalo s chlazením. Parametry broušení jsou uvedeny v tab. 15. Za těchto podmínek bylo broušeno vždy pět vzorků od každého materiálu.

Tab. 15 Parametry broušení.

Vzorek	Otáčky broušícího kotouče (n ₁) [min ⁻¹]	Otáčky vřetene (n ₂) [min ⁻¹]	Řezná rychlost (v _c) [m/s]	Tangenciální rychlost posuvu (v _{ft}) [m/min]	Pracovní radiální záběr (a _p) [mm]
1.	1000	270	20	25,5	0,015
2.	1300	270	26	25,5	0,015
3.	1600	270	33	25,5	0,015
4.	1900	270	39	25,5	0,015
5.	2200	270	45	25,5	0,015

Leštění vzorků

Leštění vzorků proběhlo ručně na leštičce Struers LaboPol 60 (viz kap. 4.2). K leštění byly použity čtyři abrazivní papíry o různé zrnitosti. Jako první byl použit papír zrnitosti FEPA P 220, následoval FEPA P 500, poté FEPA P 1000 a na závěr FEPA P 2400. Jako chladicí médium byla použita voda. Parametry leštění jsou uvedeny v tab. 16. Za těchto podmínek bylo leštěno vždy pět vzorků od každého materiálu.

Tab. 16 Parametry leštění.

Vzorek	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Čas leštění (t) [s]
1.	100	240 (4 x 60)
2.	150	240 (4 x 60)
3.	200	240 (4 x 60)
4.	250	240 (4 x 60)
5.	300	240 (4 x 60)

4.5 Měření vzorků

Veškeré měření a vyhodnocení proběhlo v laboratořích Univerzity obrany v Brně. Měření textury povrchu bylo provedeno na přístroji Talysurf CCI Lite (viz kap. 4.3). K měření byla použita bezdotyková metoda pomocí koherenčního korelačního interferometru. Získaná data byla vyhodnocena pomocí software TalyMap Platinum. Grafická dokumentace obrobených povrchů byla provedena s využitím opto-digitálního metalografického mikroskopu Olympus DSX500 (viz kap. 4.3).

K rozlišení profilů byl použit Gaussův filtr, jehož nastavení bylo odvozeno od doporučené hodnoty cut-off (základní délka). Hodnota cut-off byla volena podle normy ČSN EN ISO 4288 ve vztahu k hodnotám parametrů drsnosti Ra nebo RSm a k příslušné vyhodnocované délce (viz tab. 17).

Tab. 17 Doporučené hodnoty cut-off, základní a vyhodnocované délky.

Periodické profily	Neperiodické profily		Cut-off	Základní / Vyhodnocovaná délka
RSm [mm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Λc [mm]	Λc / L [mm]
>0,013-0,04	až 0,1	až 0,02	0,08	0,08/0,4
>0,04-0,13	>0,1-0,5	>0,02-0,1	0,25	0,25/1,25
>0,13-0,4	>0,5-10	>0,1-2	0,8	0,8/4
>0,4-1,3	>10-50	>2-10	2,5	2,5/12,5
>1,3-4,0	>50	>10	8	8/40

Z hlediska porovnatelnosti vyhodnocených parametrů byl použit jeden typ snímače a stejné podmínky pro měření všech vzorků. Podmínky měření jsou uvedeny v tab. 18.

Tab. 18 Základní podmínky měření textury povrchu.

Měřená plocha	Počet měřených profilů	Základní délka	Vyhodnocovaná délka	Filtrace
0,8 x 0,8 [mm]	1024 x 1024	0,8 [mm]	4 [mm]	Gauss – 0,8

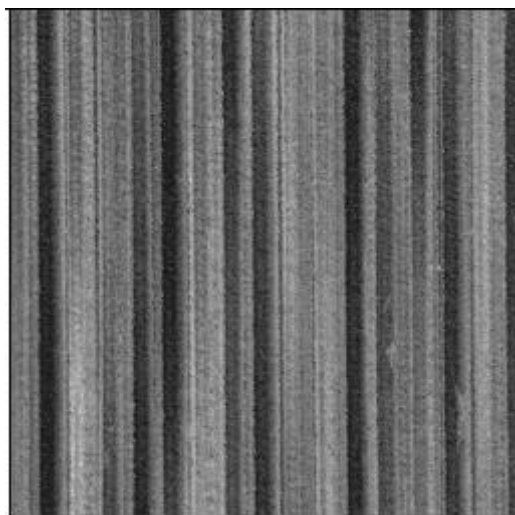
Měření textury povrchu probíhalo dle následující metodiky:

1. *Scan* – skenování hodnocené plochy.
2. *Leveling* – vyrovnaní profilu plochy podle zvolené oblasti.
3. *Form removal* – odstranění tvarových úchylek (polynomem 5. řádu).
4. *Thresholding* – zahrnutí odpovídajícího spektra dat do analýzy.
5. *Photosimulation* – vytvoření fotosimulace získaného povrchu.
6. *3D texture* – získání 3D textury povrchu.
7. *Parameter list* – získání plošných parametrů plochy.
8. *Profile extraction* – získání vhodného profilu z hodnocené plochy.
9. *Profile zoom* – zoom profilu.
10. *Filtration* – Gaussův filtr pro získání profilu drsnosti.
11. *Parameter list* – zobrazení parametrů základního profilu.

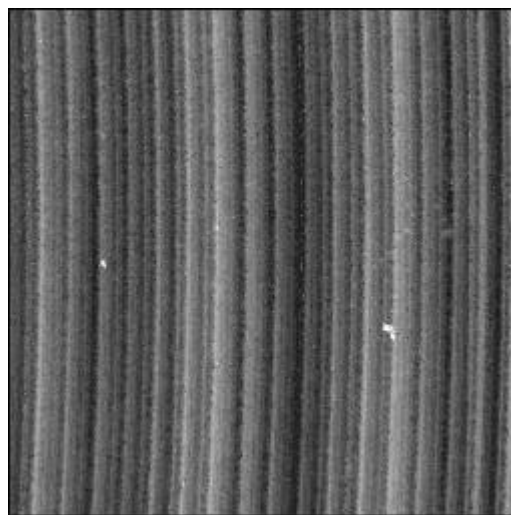
Povolená hodnota omezení dat funkce *thresholding* byla ze strany vrcholů i prohlubní do 1 %. Pro vyhodnocení bylo použito hodnoty 0,5 %, tzn., že do výpočtu parametrů drsnosti povrchu byly zahrnuty hodnoty v rozsahu 0,5 % až 99,5 % výškového rozsahu. Provedené omezení dat snížilo hodnoty drsnosti povrchu Ra v omezeném rozsahu, ale omezilo náhodné nebo ojedinělé nerovnosti na povrchu, čímž zvýšilo přesnost naměřených hodnot parametrů.

5 HODNOCENÍ TEXTURY POVRCHU

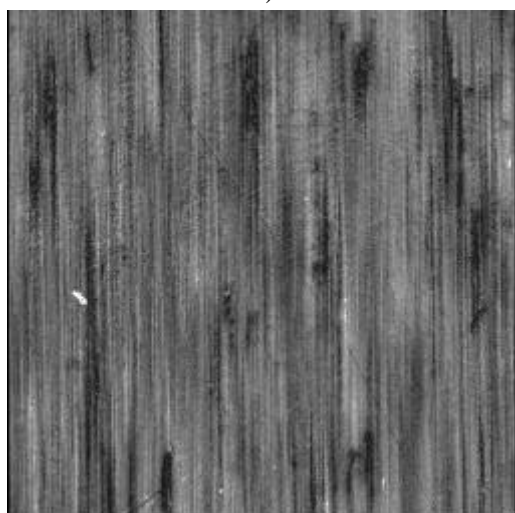
Vzhledem k velkému množství měřených vzorků, byly pro obrazovou dokumentaci vybrány pouze některé z nich, které nejlépe vystihují daný povrch. Vybrané detailní snímky obrobených povrchů lze vidět na obr. 34. Jedná se o snímky vzorků z Ertacetalu C (vzorek č. 3). Snímky byly pořízeny na opto-digitálním metalografickém mikroskopu Olympus DSX500 (viz kap. 4.3). Ze snímků je patrná odlišná topografie povrchů vzniklá jednotlivými technologiemi obrábění. Na obr. 34 lze pozorovat určitou podobnost mezi periodickými profily soustruženého a frézovaného vzorku, v důsledku obrábění pomocí nástroje s definovanou geometrií. Stejně tak lze pozorovat podobnost mezi broušeným a leštěným vzorkem, které byly obrobeny nástrojem o nedefinované geometrii, a vznikl tak neperiodický profil. Tmavší místa snímku poukazují na vzniklé prohlubně, naopak světlá místa znázorňují výstupky povrchu.



a)



b)



c)

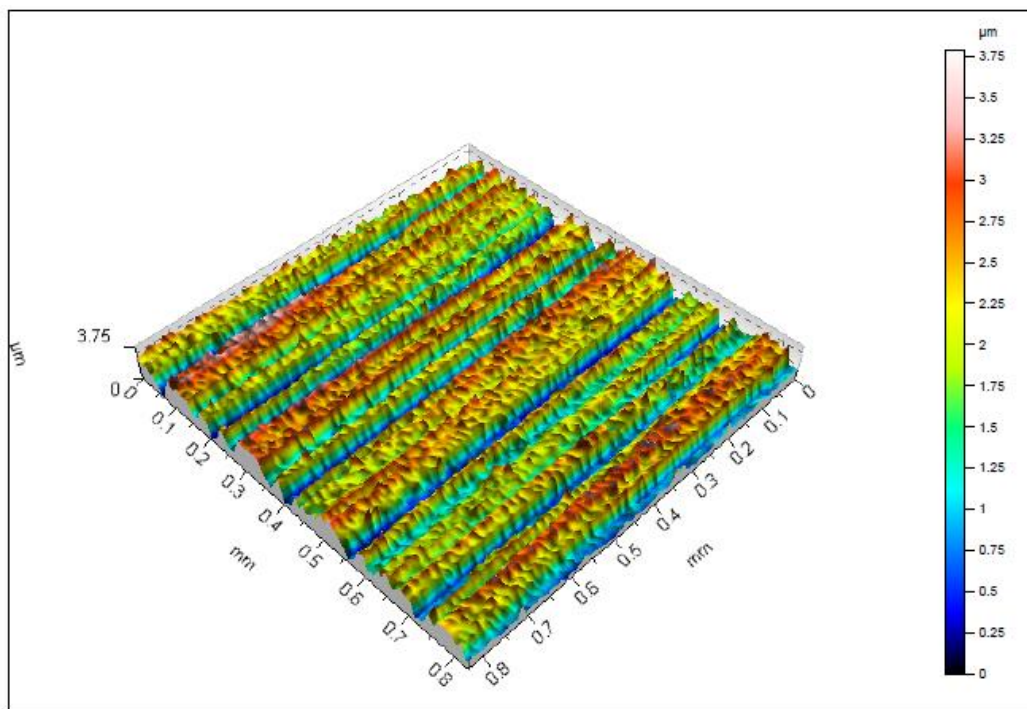


d)

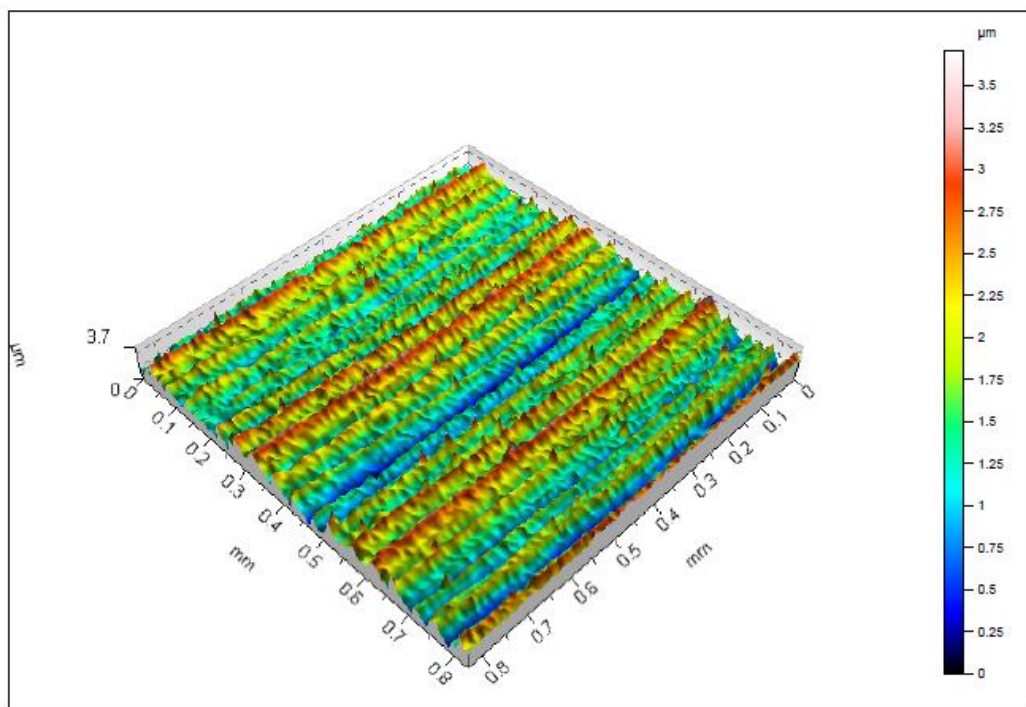
Obr. 34 Snímky obrobených povrchů (0,8 x 0,8 mm, zvětšeno 500x):

a) soustruženo, b) frézováno, c) broušeno, d) leštěno.

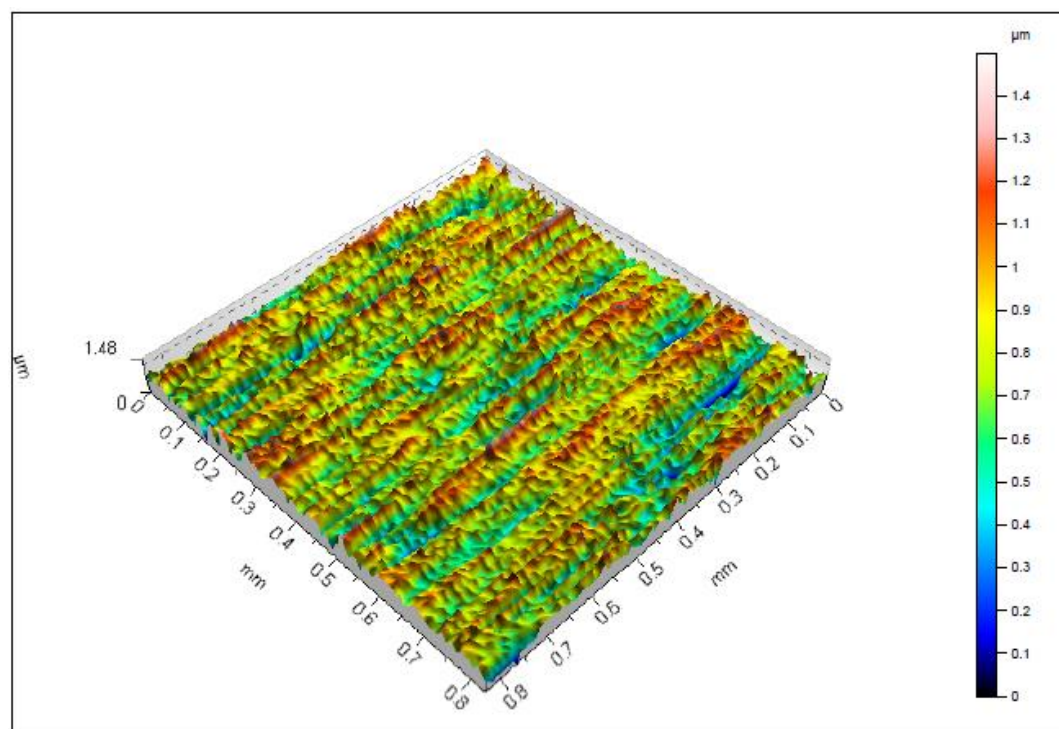
Pro komplexnější představu o vzhledu skutečných povrchů vytvořených jednotlivými technologiemi obrábění jsou na obr. 35 až 38 zobrazeny 3D vizualizace textury povrchu. Opět se jedná o stejné vybrané vzorky z materiálu Ertacetal C jako na předešlém obr. 34.



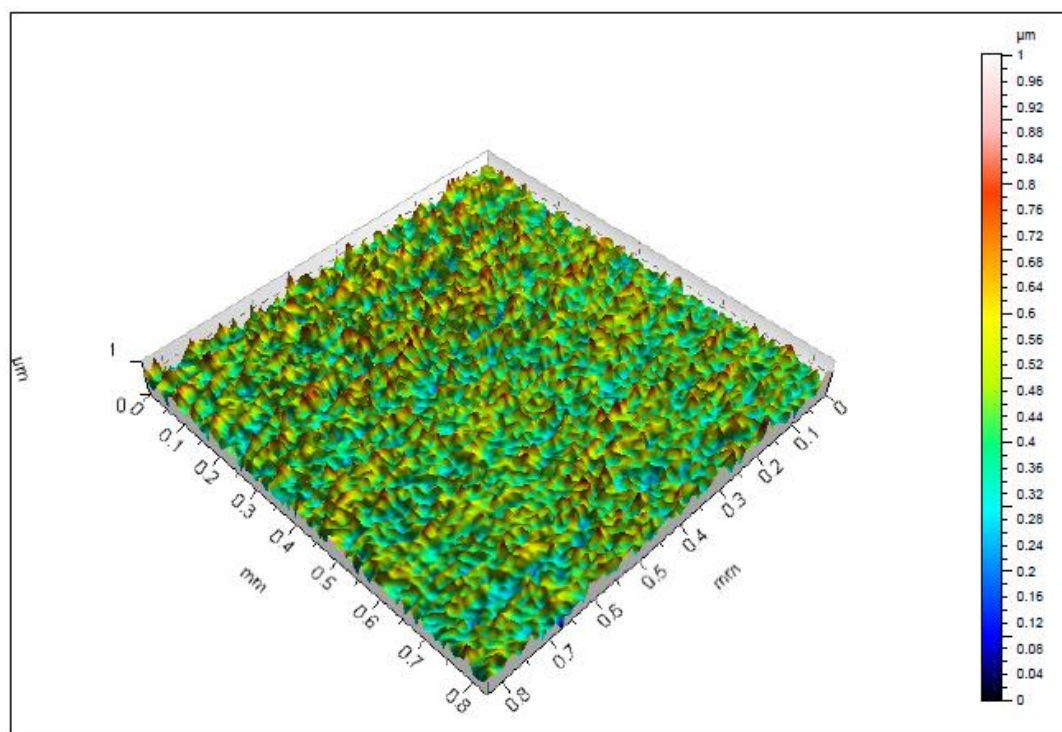
Obr. 35 3D vizualizace textury povrchu – soustruženo.



Obr. 36 3D vizualizace textury povrchu – frézováno.

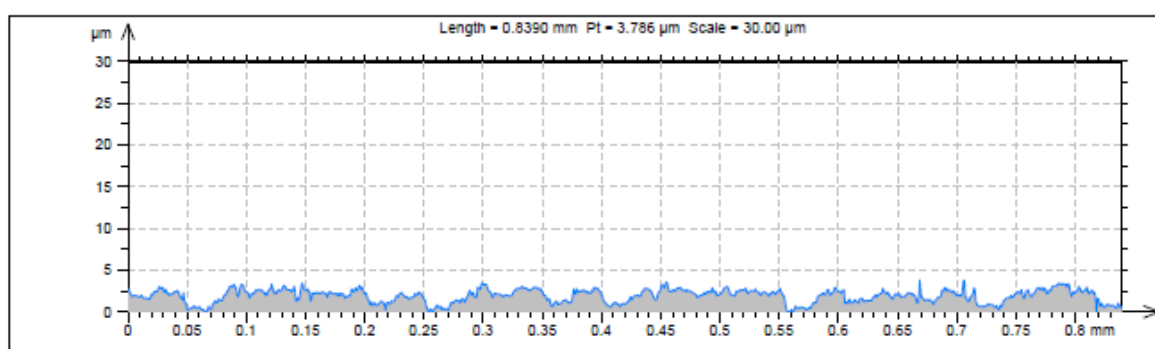


Obr. 37 3D vizualizace textury povrchu – broušeno.

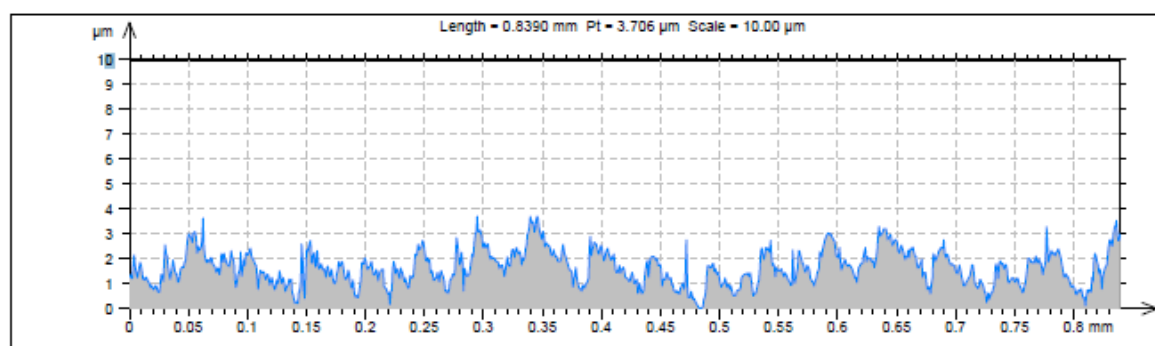


Obr. 38 3D vizualizace textury povrchu – leštěno.

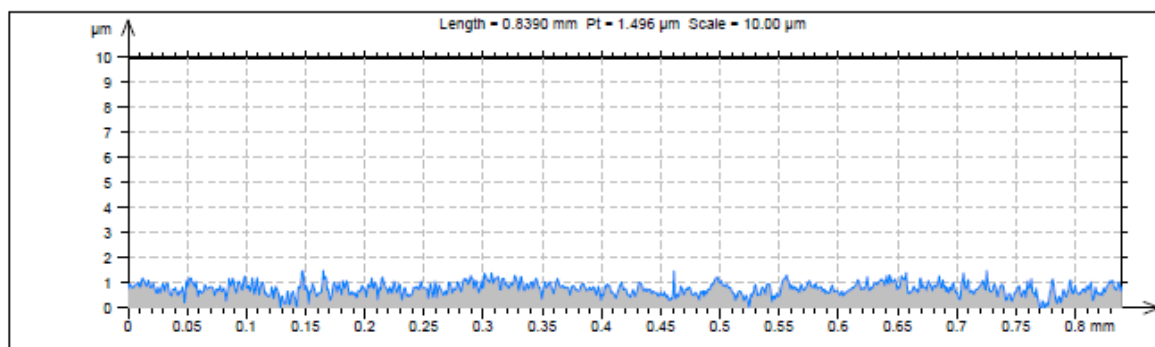
Zjednodušenou formou 3D vizualizace je znázornění textury povrchu v grafické závislosti 2D profilu drsnosti. Takto zobrazený profil si lze představit jako kolmý řez ve zvoleném místě hodnoceného povrchu. Výsledný profil byl měřen na vyhodnocované délce 4 mm. Pro lepší přehlednost byl profil drsnosti přiblížen a zobrazen na základní délce 0,8 mm (osa x). Při porovnávání jednotlivých technologií obrábění mezi sebou, je potřeba dát pozor na měřítko hodnoty výšky profilů (osa z), které se od sebe liší. Z důvodu měření velkého počtu vzorků s odlišnými hodnotami, bylo nutné zvolit měřítko hodnoty výšky profilů (osa z) pro každou technologii obrábění zvlášť tak, aby se do něho vešly všechny naměřené hodnoty pro danou technologii. Na obr. 39 až 42 jsou zobrazeny 2D profily drsnosti povrchu pro každou technologii obrábění. Opět se jedná o stejné vzorky z Ertacetalu C jako na předešlých 3D vizualizacích (obr. 35 až 38).



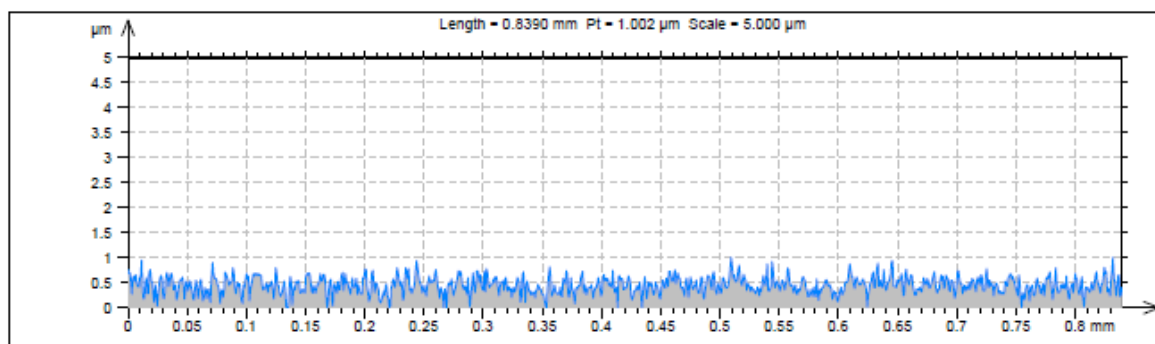
Obr. 39 Profil drsnosti – soustruženo.



Obr. 40 Profil drsnosti – frézováno.



Obr. 41 Profil drsnosti – broušeno.



Obr. 42 Profil drsnosti – leštěno.

Následuje vyhodnocení naměřených profilových a plošných parametrů drsnosti povrchu vzniklých různými technologiemi třískového obrábění pro jednotlivé zkoumané materiály (tab. 19). Pro hodnocení byly vybrány následující parametry:

Tab. 19 Přehled vyhodnocovaných parametrů.

3D amplitudové parametry		
Sa	Průměrná aritmetická úchylka omezené stupnice povrchu	[μm]
Sz	Největší výška omezené stupnice povrchu	[μm]
3D funkční parametry		
Sk	Základní hloubka jádra drsnosti omezené stupnice povrchu	[μm]
Spk	Redukovaná výška vrcholů omezené stupnice povrchu	[μm]
Svk	Redukovaná hloubka prohlubní omezené stupnice povrchu	[μm]
Sr1	Podíl materiálu nad jádrem drsnosti omezené stupnice povrchu	[%]
Sr2	Podíl materiálu pod jádrem drsnosti omezené stupnice povrchu	[%]
2D profilové parametry		
Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	[μm]
Rz	Největší výška profilu drsnosti	[μm]
RSm	Průměrná šířka prvku profilu drsnosti	[mm]
Rdq	Průměrný kvadratický sklon profilu drsnosti	[°]
2D funkční parametry		
Rk	Základní hloubka jádra profilu drsnosti	[μm]
Rpk	Redukovaná výška vrcholů profilu drsnosti	[μm]
Rvk	Redukovaná hloubka prohlubní profilu drsnosti	[μm]
Mr1	Podíl materiálu nad jádrem profilu drsnosti	[%]
Mr2	Podíl materiálu pod jádrem profilem drsnosti	[%]

5.1 Vyhodnocení textury povrchu – Ertacetal C

Zde jsou uvedeny jednotlivé výstupy z měření plošných a profilových parametrů všech vzorků z materiálu Ertacetal C. Nejprve jsou zhodnoceny samostatně jednotlivé technologie třískového obrábění a vliv odlišných řezných podmínek použitých v rámci experimentu. Následuje porovnání technologií mezi sebou s ohledem pro praktické využití.

5.1.1 Technologie soustružení

V tab. 20 jsou uvedeny naměřené hodnoty plošných a profilových parametrů drsnosti povrchu pěti soustružených vzorků z Ertacetalu C. Jednotlivé vzorky byly soustruženy při různých řezných podmínkách (viz kap. 4.4). Při pohledu na data lze vidět nízké rozdíly v naměřených hodnotách parametrů, přičemž nelze vidět žádná pravidelnost, kdy by např. s rostoucími otáčkami výrazně rostla nebo klesala kvalita povrchu. Hodnoty parametrů průměrné aritmetické úchytky (S_a , R_a) jsou přibližně stejné, v toleranci $\pm 0,1 \mu\text{m}$. Hodnoty parametrů byly zprůměrovány a porovnány s ostatními technologiemi obrábění (viz tab. 24). Následuje vyhodnocení jednotlivých parametrů s ohledem na praktické využití materiálu.

Tab. 20 Ertacetal C – soustružené vzorky.

Vzorek	1.	2.	3.	4.	5.
Otáčky	2100 [min ⁻¹]	2280 [min ⁻¹]	2450 [min ⁻¹]	2600 [min ⁻¹]	2700 [min ⁻¹]
3D amplitudové parametry					
S_a [μm]	0,62	0,54	0,64	0,61	0,53
S_z [μm]	5,54	3,87	3,77	3,82	3,38
3D funkční parametry					
S_k [μm]	2,01	1,60	1,61	1,64	1,62
S_{pk} [μm]	0,80	0,52	0,52	0,58	0,47
S_{vk} [μm]	0,68	0,64	0,83	0,63	0,64
S_{r1} [%]	7,02	5,88	5,94	8,27	10,12
S_{r2} [%]	91,12	87,13	86,34	88,57	88,72
2D profilové parametry					
R_a [μm]	0,56	0,51	0,60	0,60	0,48
R_z [μm]	4,25	3,31	3,47	3,57	3,12
R_{Sm} [mm]	0,028	0,029	0,031	0,037	0,030
R_{dq} [°]	14,38	11,97	11,57	10,40	9,69
2D funkční parametry					
R_k [μm]	1,94	1,54	1,78	1,77	1,48
R_{pk} [μm]	0,54	0,46	0,38	0,55	0,43
R_{vk} [μm]	0,50	0,71	0,81	0,77	0,79
$Mr1$ [%]	7,01	7,96	6,07	9,25	10,80
$Mr2$ [%]	91,16	84,36	87,67	86,98	88,00

5.1.2 Technologie frézování

V tab. 21 jsou uvedeny naměřené hodnoty plošných a profilových parametrů drsnosti povrchu pěti frézovaných vzorků z Ertacetalu C. Jednotlivé vzorky byly frézovány při odlišných řezných podmínkách (viz kap. 4.4). Stejně jako v případě soustružení, i při frézování neměla změna řezné rychlosti žádný významný vliv na hodnoty parametrů průměrné aritmetické úchylky (S_a , R_a). Nebyl zaznamenán vliv chlazení na kvalitu obrobeneho povrchu. Hodnoty parametrů průměrné aritmetické úchylky, v případě suchého i mokrého obrábění, se liší v toleranci $\pm 0,1 \mu\text{m}$. Pouze u jednoho vzorku (č. 4, chlazené) byly naměřeny výrazně odlišné hodnoty oproti hodnotám ostatním. Na snímku materiálu nebyla vidět žádná deformace, proto lze konstatovat, že tato odchylka byla pravděpodobně způsobena špatným upnutím obrobku nebo nečistotou na nástroji. Hodnoty parametrů byly zprůměrovány a porovnány s ostatními technologiemi obrábění (viz tab. 24). Následuje vyhodnocení jednotlivých parametrů s ohledem na praktické využití materiálu.

Tab. 21 Ertacetal C – frézované vzorky.

Vzorek	1.		2.		3.		4.		5.	
Otáčky	3200 [min ⁻¹]		3425 [min ⁻¹]		3650 [min ⁻¹]		3900 [min ⁻¹]		4100 [min ⁻¹]	
Chlazení	NE	ANO	NE	ANO	NE	ANO	NE	ANO	NE	ANO
3D amplitudové parametry										
$S_a [\mu\text{m}]$	0,44	0,48	0,44	0,52	0,41	0,47	0,54	1,06	0,53	0,55
$S_z [\mu\text{m}]$	3,10	3,09	4,18	4,54	2,81	3,08	3,7	17,89	3,95	4,59
3D funkční parametry										
$S_k [\mu\text{m}]$	1,37	1,59	1,21	1,27	1,28	1,32	1,48	2,33	1,93	1,63
$S_{pk} [\mu\text{m}]$	0,66	0,50	0,58	0,68	0,39	0,77	0,60	2,96	0,52	0,51
$S_{vk} [\mu\text{m}]$	0,51	0,42	0,48	0,55	0,36	0,55	0,49	2,09	0,50	1,11
$Sr1 [\%]$	10,68	6,08	10,38	10,75	8,53	10,61	12,20	9,13	5,80	9,16
$Sr2 [\%]$	90,03	88,43	90,13	90,35	91,43	90,96	92,25	86,38	92,30	84,46
2D profilové parametry										
$R_a [\mu\text{m}]$	0,42	0,44	0,42	0,50	0,44	0,46	0,51	1,01	0,51	0,53
$R_z [\mu\text{m}]$	3,02	2,56	3,44	4,48	2,60	2,96	3,44	14,88	3,4	3,93
$R_{Sm} [\text{mm}]$	0,029	0,033	0,029	0,025	0,028	0,029	0,029	0,029	0,026	0,027
$R_{dq} [^\circ]$	8,19	8,61	11,44	10,11	8,22	8,33	11,10	46,80	12,31	14,89
2D funkční parametry										
$R_k [\mu\text{m}]$	1,33	1,51	1,28	1,24	1,24	1,34	1,67	2,38	1,88	1,72
$R_{pk} [\mu\text{m}]$	0,64	0,34	0,47	0,59	0,48	0,54	0,73	1,97	0,50	0,47
$R_{vk} [\mu\text{m}]$	0,65	0,50	0,47	0,46	0,57	0,45	0,49	2,26	0,52	1,04
$Mr1 [\%]$	10,14	6,23	8,67	8,77	10,46	9,01	9,66	11,31	7,36	7,92
$Mr2 [\%]$	89,66	88,73	88,27	88,97	87,56	89,12	90,93	83,52	92,47	84,82

5.1.3 Technologie broušení

V tab. 22 jsou uvedeny naměřené hodnoty plošných a profilových parametrů drsnosti povrchu pěti broušených vzorků z Ertacetalu C. Jednotlivé vzorky byly broušeny při odlišných podmínkách (viz kap. 4.4). Při pohledu na data lze vidět dosažení velmi podobných hodnot u 1., 2. a 4. vzorku. U 5. vzorku došlo ke zhoršení naměřených hodnot, proto lze konstatovat, že zvolené podmínky broušení u 5. vzorku jsou pro tento materiál nevhodné. Hodnoty parametrů byly dále zprůměrovány a porovnány s ostatními technologiemi obrábění (viz tab. 24). Následuje vyhodnocení jednotlivých parametrů s ohledem na praktické využití materiálu.

Tab. 22 Ertacetal C – broušené vzorky.

Vzorek	1.	2.	3.	4.	5.
Otáčky	1000 [min ⁻¹]	1300 [min ⁻¹]	1600 [min ⁻¹]	1900 [min ⁻¹]	2200 [min ⁻¹]
3D amplitudové parametry					
Sa [μm]	0,24	0,23	0,19	0,23	0,30
Sz [μm]	2,20	2,14	1,50	2,27	3,27
3D funkční parametry					
Sk [μm]	0,63	0,68	0,55	0,57	0,74
Spk [μm]	0,27	0,30	0,23	0,22	0,30
Svk [μm]	0,53	0,48	0,26	0,39	0,84
Sr1 [%]	9,72	10,23	10,13	9,58	9,17
Sr2 [%]	86,42	88,33	89,83	88,13	86,27
2D profilové parametry					
Ra [μm]	0,22	0,24	0,17	0,17	0,31
Rz [μm]	1,93	1,97	1,29	1,71	2,80
RSm [mm]	0,021	0,023	0,018	0,019	0,034
Rdq [°]	6,96	6,57	5,73	5,95	6,62
2D funkční parametry					
Rk [μm]	0,61	0,68	0,53	0,46	0,76
Rpk [μm]	0,22	0,22	0,19	0,23	0,25
Rvk [μm]	0,55	0,51	0,30	0,37	1,23
Mr1 [%]	9,27	8,39	10,38	10,48	9,10
Mr2 [%]	84,32	84,79	87,23	86,77	82,58

5.1.4 Technologie leštění

V tab. 23 jsou uvedeny naměřené hodnoty plošných a profilových parametrů drsnosti povrchu pěti leštěných vzorků z Ertacetalu C. Jednotlivé vzorky byly leštěny při odlišných podmínkách (viz kap. 4.4). Při pohledu na data lze konstatovat, že rozdíly hodnot parametrů drsnosti byly pravděpodobně způsobeny odlišnými silami a úhly, jakými byly vzorky přitlačovány k leštícímu papíru během ručního leštění. Hodnoty parametrů byly zprůměrovány a porovnány s ostatními technologiemi obrábění (viz tab. 24). Následuje vyhodnocení jednotlivých parametrů s ohledem na praktické využití materiálu.

Tab. 23 Ertacetal C – leštěné vzorky.

Vzorek	1.	2.	3.	4.	5.
Otáčky	100 [min ⁻¹]	150 [min ⁻¹]	200 [min ⁻¹]	250 [min ⁻¹]	300 [min ⁻¹]
3D amplitudové parametry					
Sa [μm]	0,13	0,17	0,32	0,15	0,14
Sz [μm]	1,00	1,47	5,6	1,56	1,52
3D funkční parametry					
Sk [μm]	0,40	0,44	0,83	0,42	0,41
Spk [μm]	0,20	0,25	0,79	0,27	0,24
Svk [μm]	0,17	0,23	0,79	0,20	0,25
Sr1 [%]	10,92	10,95	11,52	10,98	10,56
Sr2 [%]	90,32	89,80	86,87	89,63	88,61
2D profilové parametry					
Ra [μm]	0,11	0,15	0,23	0,12	0,13
Rz [μm]	0,87	1,43	4,10	1,07	1,19
RSm [mm]	0,012	0,013	0,017	0,013	0,014
Rdq [°]	5,61	6,01	14,47	6,31	6,36
2D funkční parametry					
Rk [μm]	0,34	0,35	0,57	0,37	0,38
Rpk [μm]	0,14	0,19	0,39	0,19	0,16
Rvk [μm]	0,13	0,18	0,60	0,16	0,21
Mr1 [%]	11,02	10,52	10,61	11,05	11,12
Mr2 [%]	90,37	89,82	86,46	90,00	89,72

5.1.5 Porovnání parametrů jednotlivých technologií obrábění

Pro porovnání jednotlivých operací třískového obrábění mezi sebou, byly hodnocené parametry měřených vzorků v rámci dané technologie obrábění zprůměrovány. Zprůměrované výsledky měření všech technologií obrábění jsou uvedeny v tab. 24. Pro objektivnější porovnání nebyly do počítaného průměru zahrnuty hodnoty vzorků, které se výrazně lišily od hodnot ostatních. Dále je uvedeno vyhodnocení jednotlivých plošných i profilových parametrů drsnosti povrchu vzhledem k praktickému využití.

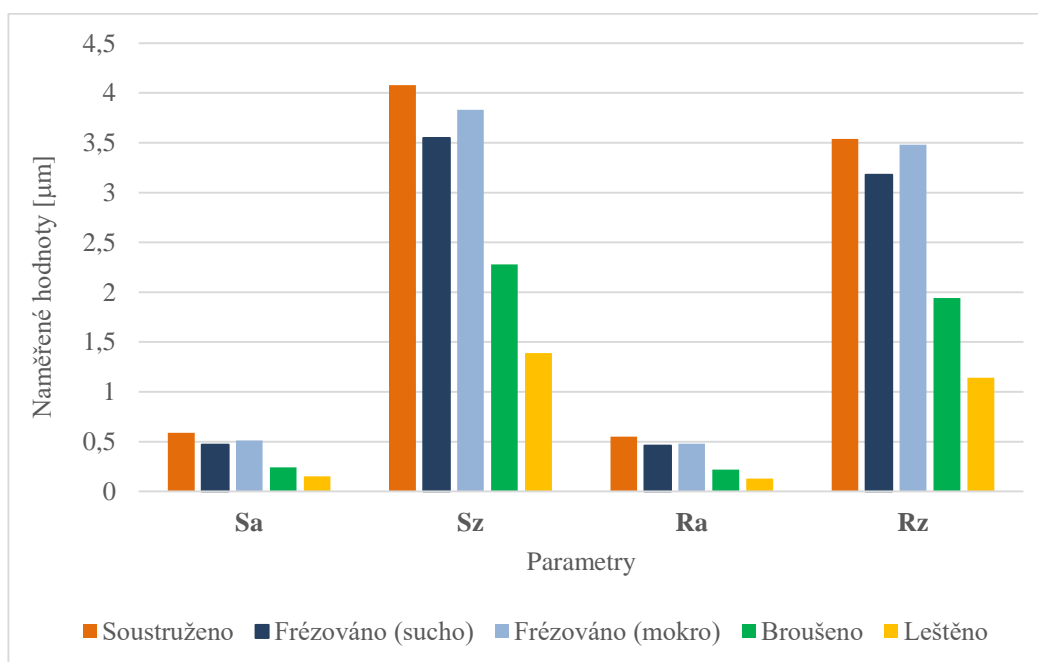
Tab. 24 Ertacetal C – porovnání technologií obrábění.

	Soustruženo	Frézováno (na sucho)	Frézováno (chlazeno)	Broušeno	Leštěno
3D amplitudové parametry					
Sa [μm]	0,59	0,47	0,51	0,24	0,15
Sz [μm]	4,08	3,55	3,83	2,28	1,39
3D funkční parametry					
Sk [μm]	1,69	1,45	1,45	0,63	0,42
Spk [μm]	0,58	0,55	0,62	0,26	0,24
Svk [μm]	0,68	0,47	0,65	0,50	0,21
Sr1 [%]	7,45	9,52	9,15	9,77	10,85
Sr2 [%]	88,38	91,23	88,55	87,80	89,59
2D profilové parametry					
Ra [μm]	0,55	0,46	0,48	0,22	0,13
Rz [μm]	3,54	3,18	3,48	1,94	1,14
RSm [mm]	0,031	0,028	0,029	0,023	0,013
Rdq [°]	11,60	10,25	10,49	6,37	6,07
2D funkční parametry					
Rk [μm]	1,70	1,48	1,45	0,61	0,36
Rpk [μm]	0,47	0,56	0,49	0,22	0,17
Rvk [μm]	0,72	0,54	0,61	0,59	0,17
Mr1 [%]	8,22	9,26	7,98	9,52	10,93
Mr2 [%]	87,63	89,78	87,91	85,14	89,98

5.1.6 Zhodnocení naměřených parametrů vzhledem k praktickému využití

Využití plošných parametrů k hodnocení povrchu je obdobné jako v případě profilových parametrů s tou výhodou, že plošné parametry vyhodnocují celou měřenou plochu, zatímco profilové parametry popisují pouze část měřené plochy. Z toho lze předpokládat, že plošné parametry budou dosahovat převážně vyšších hodnot než parametry profilové. To se potvrdilo i v předešlém měření. Plošné parametry mají všeobecně vyšší vypovídající schopnost o funkčních vlastnostech zkoumaného povrchu, protože hodnotí povrch jako celek. Použití plošného parametru S_a namísto profilového R_a je zejména vhodné v případě měření neperiodických povrchů, které vznikají např. technologiemi broušení a leštění.

Z tab. 24 lze vidět rozdílné hodnoty naměřených drsností povrchů, vyrobených jednotlivými technologiemi třískového obrábění, i přesto, že pro technologie soustružení a frézování byly voleny stejné řezné podmínky. Průměrná aritmetická úchylka povrchu S_a je v případě soustružení vyšší o $0,12 \mu\text{m}$ než při frézování. Takový rozdíl mohl být způsoben špatnou geometrií soustružnického nože nebo jeho nedostatečnou ostrostí. Při frézování nebyl zaznamenán žádný výrazný vliv použití chlazení na výslednou drsnost obrobeného povrchu. Parametr S_a chlazeného a nechlazeného povrchu se liší pouze o $0,04 \mu\text{m}$. Nejlepších výsledků bylo dosaženo podle očekávání technologiemi leštění a broušení, které se odvíjí od zrnitosti abrazivního nástroje. Pomocí parametrů nejvyšší výšky profilu R_z a vyhodnocované plochy S_z lze hodnotit náchylnost povrchu ke vzniku trhlin. Vysoké hodnoty těchto parametrů také značí rychlejší opotřebení povrchu a horší těsnící vlastnosti zapříčiněné velkými vzdálenostmi mezi výstupky a prohlubněmi. Povrch s vysokými hodnotami S_z a R_z má také negativní vliv na opotřebení naneseného mazacího filmu. Nejvyšší hodnot parametrů R_z bylo dosaženo technologií soustružení. Grafické znázornění těchto parametrů je uvedeno na obr. 43.



Obr. 43 Porovnání parametrů – Ertacetal C.

Parametr popisující průměrnou šířku prvku profilu drsnosti R_{Sm} bývá podle předpokladů číselně rovný se zvoleným posuvem při obrábění a lze ho sledovat např. ke kontrole stavu rezného nástroje. Tento předpoklad nebyl v měření potvrzen. Technologie soustružení a frézování dosáhly přibližně stejné hodnoty parametru R_{Sm} , avšak nižší, než byl zvolený posuv (přibližně o 0,02 mm). Leštění vzorků probíhalo ručně, a proto nelze hodnotit spojitost mezi parametrem R_{Sm} a posuvem při obrábění.

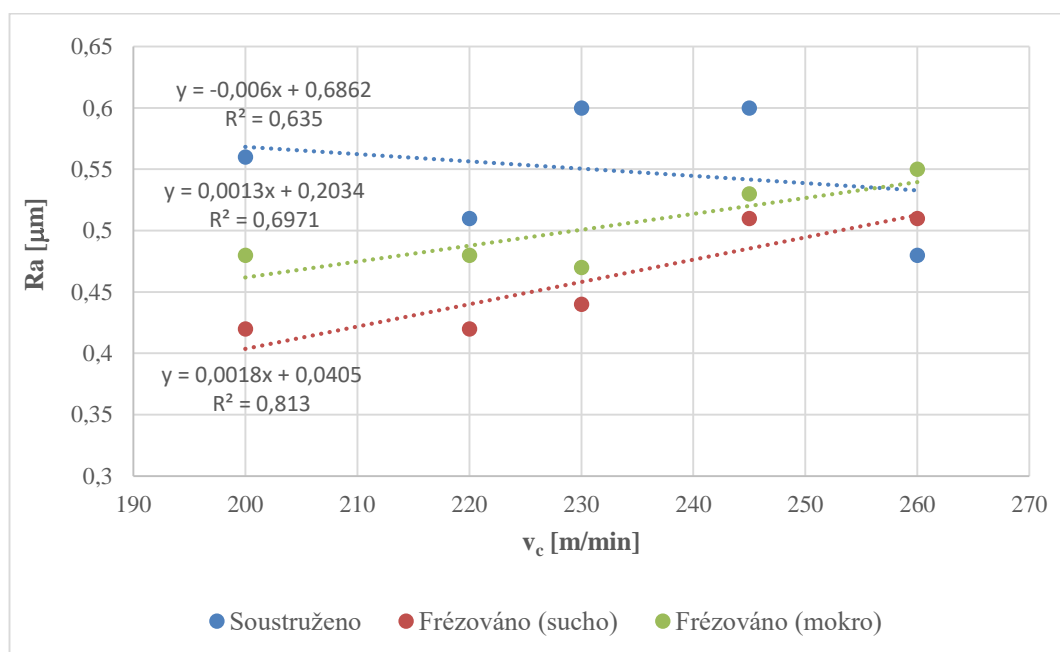
Dalším hodnotícím parametrem je průměrný kvadratický sklon profilu R_{dq} . Tento parametr je vhodný zejména pro velmi jemné plochy. Větší sklon znamená vyšší tření materiálu, snadnější deformaci při zatížení a celkově větší opotřebení materiálu. Hlavní výhodou většího sklonu je přilnavost materiálu. Sклон profilu má také významný vliv na vibrace vzniklé na povrchu. Čím je sklon menší, tím jsou nižší i vibrace. Nízký sklon je typický pro dobrou odrazivost povrchu. Dle předpokladu nejnižší hodnoty sklonu bylo dosaženo technologiemi broušení a leštění. Nejvyšší hodnoty sklonu bylo dosaženo technologií soustružení a to o 1,35 ° více než technologií frézování.

Posledními měřeními parametry byly tzv. funkční parametry drsnosti povrchu. Výstupem těchto parametrů je nosný podíl materiálu, který je charakteristický pro jednotlivé technologie obrábění. Funkční parametry mají významný vliv pro posuzování zatěžovaných funkčních povrchů, řešení problémů tření, mazání a opotřebení. Nejdůležitější význam pro funkční vlastnosti má parametr R_k a jeho plošná obdoba S_k , které popisují šířku jádra materiálu. Čím menší je šířka jádra, tím má povrch rovinnější charakter a dochází k menšímu opotřebení materiálu na stykových plochách. Nízké hodnoty šířky jádra se dosahuje především jemnými dokončovacími operacemi obrábění (broušení, leštění), což bylo v měření potvrzeno. Soustružené a frézované vzorky dosáhly opět podobných hodnot. Parametr R_{pk} (S_{vk}) vyjadřuje podíl výšky profilů, které se nachází nad základním jádrem profilu R_k (S_k). Ojedinele vysoké výstupky nejsou do hodnoty tohoto parametru zahrnuty. Nejvyšších hodnot parametrů R_{pk} (S_{pk}) bylo dosaženo technologií frézování, proto se bude frézovaný povrch nejrychleji opotřebovávat. Naopak broušené a leštěné povrchy budou více odolávat opotřebení a protrhávání mazacího filmu. Parametr redukované výšky prohlubní R_{vk} (S_{vk}) vyjadřuje podíl výšky profilů pod základním jádrem profilu R_k (S_k), redukovaný o ojedinele vysoké hodnoty prohlubní. Parametr R_{vk} má významný vliv z hlediska posuzování udržitelnosti naneseného maziva na stykovou plochu. Z hlediska praxe povrch s vyšší hodnotou parametru R_{vk} bude lépe držet nanesené mazivo v místě styku ploch. Z naměřených dat lze vidět, že v případě technologií soustružení a broušení převládají na vzniklém povrchu prohlubně nad výstupky. V případě frézování a leštění je rozložení výstupků a prohlubní vyvážené. Podíl materiálu nad a pod jádrem procentuálně vyjadřují parametry Mr_1 a Mr_2 (Sr_1 a Sr_2). Čím je menší vzdálenost mezi hodnotami Mr_1 a Mr_2 , tím menší je i kontaktní spolehlivost povrchu při zatížení. Podílové rozložení materiálu je u všech technologií téměř rovnocenné. Nejlepších hodnot materiálového podílu bylo dosaženo technologií frézování (81,7 %), nejhůře dopadl broušený povrch (78 %) [49].

Z výsledků si lze povšimnout, že každá technologie obrábění bude mít určité výhody a nevýhody pro různá praktická využití, a proto je nutno zvolit technologii obrábění podle toho, k jakému účelu bude povrch sloužit. Nelze tedy jednoznačně stanovit, která technologie je nejlepší.

5.1.7 Vliv řezné rychlosti na výslednou drsnost povrchu

Porovnání vlivu změny řezné rychlosti na výslednou drsnost povrchu obráběných vzorků je graficky znázorněno na obr. 44. Jsou zde porovnávány technologie soustružení a frézování, u kterých byly voleny stejné řezné podmínky, za účelem dosažení podobných hodnot parametrů drsnosti povrchu. V grafické závislosti je také porovnán vliv použití chladicí kapaliny při procesu frézování. Obě technologie obrábění vytváří periodický profil povrchu, proto, jako hodnotící parametr, byla vybrána průměrná aritmetická úchylka profilu R_a . Hodnoty tohoto parametru byly zaneseny do grafu spolu s danou řeznou rychlostí a následně proloženy lineární regresní přímkou. U technologie frézování lze z grafické závislosti pozorovat mírný rostoucí trend přímky při navyšování řezné rychlosti. V případě soustružení je trend regresní přímky opačný, tedy klesající.



Obr. 44 Vliv řezné rychlosti na drsnost povrchu – Ertacetal C.

6 DISKUZE K DOSAŽENÝM VÝSLEDKŮM

V případě ostatních testovaných materiálů v rámci experimentu (Tivar 1000, Ertalon 6SA a Ketron Peek 1000) bylo dosaženo obdobných výsledků vlivu konvenčních způsobů třískového obrábění na výslednou texturu povrchu, jako v případě předešlého materiálu Ertacetalu C. Jednotlivé materiály se od sebe mírně odlišovaly ve výsledných hodnotách naměřených parametrů drsnosti povrchu v rámci zkoumané technologie obrábění. Veškeré naměřené hodnoty plošných a profilových parametrů drsnosti povrchu pro každý materiál jsou uvedeny v přílohách 1 až 15. Při přípravě vzorků byly rovněž zaznamenány jisté rozdíly při obrábění jednotlivých materiálů, jako je např. náchylnost k tvorbě otřepů, nebo špatné dělení vzniklé třísky během procesu obrábění. Testované materiály se také od sebe liší svými mechanickými, tepelnými a chemickými vlastnostmi a v neposlední řadě svoji cenou. Pro porovnání materiálů mezi sebou byl vytvořen bodový systém, který zohledňuje několik vybraných veličin, které mohou mít vliv při výběru správného materiálu (viz tab. 25). V rámci bodového systému jsou udělovány body od 1 do 4, kde vyšší počet bodů značí výhodu daného materiálu oproti ostatním.

Tab. 25 Bodové porovnání jednotlivých materiálů.

	Ertacetal C	Tivar 1000	Ertalon 6SA	Ktr. Peek 1000
Hmotnost	1	4	3	2
Obrobitelnost	4	1	3	2
Kvalita povrchu	4	1	2	3
Mech. vlastnosti	2	1	3	4
Max. provozní teplota	3	1	2	4
Min. provozní teplota	2	4	1	3
Chemická odolnost	3	1	4	2
Nasákavost	2	4	1	3
Cena	2	4	3	1
Součet	23	21	22	24

Z výše uvedeného hodnocení se na první příčce umístil Ketron Peek 1000. Tento materiál z řady vysokovýkonnostních plastů disponuje svými mechanickými vlastnostmi a vysokou provozní teplotou (až 310 °C). Ovšem nelze opomenout vysokou cenu tohoto materiálu. Druhou příčku v experimentu obsadil Ertacetal C, který se velmi dobře obrábí a je vhodný pro výrobu přesných mechanických součástí, což potvrdil i tento experiment. Spolu s Ertalonem 6SA patří do třídy konstrukčních plastů. Právě zmiňovaný Ertalon 6SA se umístil na třetí příčce v rámci hodnocení tohoto experimentu. Jedná se o univerzálně použitelný materiál, který je ceněný i pro svoji dobrou chemickou odolnost. Poslední příčku obsadil Tivar 1000, který patří do skupiny standardních plastů. Tento materiál je ideální volbou pro méně namáhané součásti. Jeho hlavní výhodou je nízká pracovní teplota (až -200 °C) a nízká cena. Z výsledků si lze povšimnout, že každý materiál má určité výhody a nevýhody pro různá praktická využití, a proto je nutno zvolit materiál dle toho, k jakému účelu bude sloužit. Nelze tedy jednoznačně říci, který materiál je nejlepší.

ZÁVĚR

Diplomová práce řeší problematiku hodnocení vlivu konvenčních způsobů třískového obrábění (soustružení, frézování, broušení a leštění) na texturu povrchu funkčních ploch u vybraných technických plastů (Ertacetal C, Tivar 1000, Ertalon 6SA, Ketron Peek 1000), a zároveň pojednává o vlivu chlazení při obrábění plastových materiálů. Teoretická část práce charakterizuje technické plasty, možnosti jejich obrábění, a rozebírá hodnocení drsnosti povrchu. Experimentální část práce popisuje proces od přípravy vzorků, volby řezných podmínek, až po samotné měření drsnosti obrobených povrchů. Vzorky byly měřeny bezdotykovou metodou pomocí koherenčního korelačního interferometru. Vyhodnocovány byly plošné a profilové parametry drsnosti povrchu (S_a , S_z , S_k , S_{pk} , S_{vk} , Sr_1 , Sr_2 , R_a , R_z , R_{Sm} , R_{dq} , R_k , R_{pk} , R_{vk} , Mr_1 , Mr_2). V další části bylo provedeno statistické zpracování naměřených dat, grafické porovnání jednotlivých metod třískového obrábění a vyhodnocení naměřených parametrů drsnosti povrchu vzhledem k praktickému využití. Na závěr byla provedena diskuze k dosaženým výsledkům jednotlivých materiálů a zhodnocení jejich použití v praxi.

V diplomové práci bylo dosaženo následujících cílů:

- byla zpracována rešerše v oblasti technických plastů a možnosti jejich obrábění,
- byl proveden rozbor parametrů textury povrchu,
- byl porovnán vliv třískového obrábění na texturu povrchu zkušebních vzorků z technických plastů,
- byla provedena analýza, zpracování a vyhodnocení naměřených dat,
- bylo provedeno zhodnocení dosažených výsledků vzhledem k praktickému využití materiálů.

Závěrem lze konstatovat, že všechny cíle diplomové práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PÍŠKA, M. a kolektiv. *Speciální technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. RAJASEKARAN, T., VINAYAGAM, B., PALANIKUMAR, K. a PRAKASH, S. Influence of machining parameters on surface roughness and material removal rate in machining carbon fiber reinforced polymer material. In: *Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering -2010* [online]. IEEE, 2010, s. 75-80 [cit. 2021-5-12]. ISBN 9781424490813. Dostupné z: doi:10.1109/FAME.2010.5714801
3. COCOCETTA, N., PEARL, D., JAHAN, M. a JIANFENG, A. Investigating surface finish, burr formation, and tool wear during machining of 3D printed carbon fiber reinforced polymer composite. *Journal of manufacturing processes* [online]. Elsevier, 2020, **56**, 1304-1316 [cit. 2021-5-12]. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2020.04.025
4. KINI, M. a CHINCHOLKAR, A. Effect of machining parameters on surface roughness and material removal rate in finish turning of $\pm 30^\circ$ glass fibre reinforced polymer pipes. *Materials in engineering* [online]. Elsevier, 2010, **31**(7), 3590-3598 [cit. 2021-5-12]. ISSN 0261-3069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2010.01.013
5. CABRERA, F., KHAMLIHI, A., LOSILLA, I. a HANAFI, I. Mathematical modelling for predicting surface roughness during machining of PEEK CF30 composite. *International Review of Applied Sciences and Engineering* [online]. Budapest: Akademiai Kiado Zrt, 2012, 3(2), 87-96 [cit. 2021-5-18]. ISSN 20620810. Dostupné z: doi:10.1556/IRASE.3.2012.2.1
6. IZAMSHAH, R., AZAM, M., HADZLEY, M., Md ALI, M., KASIM, M. a AZIZ, A. Study of Surface Roughness on Milling Unfilled-polyetheretherketones Engineering Plastics. In: *Procedia engineering* [online]. Elsevier, 2013, s. 654-660 [cit. 2021-5-18]. ISSN 1877-7058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2013.12.235
7. KHORAN, M., AMIRABADI, H. a AZARHOUSHANG, B. The effects of cryogenic cooling on the grinding process of polyether ether ketone (PEEK). *Journal of manufacturing processes* [online]. Elsevier, 2020, **56**, 1075-1087 [cit. 2021-5-18]. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2020.05.002
8. SHEIKH-AHMAD, J. *Machining of polymer composites*. London: Springer, 2009. ISBN 978-0-387-35539-9.
9. ENSINGER GMBH. *Ensinger Engineering & High Performance Plastics Manual* [online]. Germany, 2012 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Technical-Resources/Technical-Resources/Engineering-Plastics-Manual-Ensinger?fbclid=IwAR07vcfwcQ_I6q03CatHtxKO_49MxvLDCpO4e3a1ik3ltvXU3MUwvalgxDA.

10. TRISTAR PLASTICS CORP. a QUADRANT ENGINEERING PLASTIC PRODUCTS. *Machining Plastics: The Essential Guide to Materials, Tools and Techniques* [online]. Shrewsbury US, 2015 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://cdn.thomasnet.com/ccp/00399914/221437.pdf>.
11. ENSINGER GMBH. *Machining Recommendations for Semi-Finished Engineering Plastics* [online]. Germany, 2012 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Technical-Resources/Technical-Resources/Machining-Engineering-Plastics>
12. ŘASA, J. a GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-7183-337-1.
13. Vlastnosti látek a materiálů. *E - konstruktér* [online]. 16.08. 2013 [cit. 2021-4-12]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticke-informace/vlastnosti-latek-a-materialu>
14. Plasty - mechanické vlastnosti. *E - konstruktér* [online]. 16.08. 2013 [cit. 2021-4-12]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/plasty-mechanicke-vlastnosti>
15. *Ultimate Machining Plastics Guide* [online]. Hillsboro: R & R Manufacturing, 2020 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://randrmanufacturing.com/blog/ultimate-machining-plastics-guide/>.
16. ŠTĚPEK, J., KUTA, A. a ZELINGER, J. *Technologie zpracování a vlastnosti plastů: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy chemickotechnologické, studijní obor 28-10-8 Technologie výroby a zpracování polymerů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
17. KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2005. 270s. ISBN 80-214-3068-0.
18. DUPONT DE NEMOURS INC. *Machining Guide for VESPEL® Parts and Shapes* [online]. Wilmington US, 2014 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Technical-Resources/Technical-Resources/Vespel-Machining-Guide?fbclid=IwAR2msPfMVyVD0EGgSIIXrrXKIGrjNajcO3aygB7pE__D5_wf7UgWYOETfWM.
19. GILBERT CURRY INDUSTRIAL PLASTICS CO LTD a QUADRANT ENGINEERING PLASTIC. *Machining Guide for Engineering Plastics* [online]. Coventry UK [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: https://www.theplasticshop.co.uk/plastic_technical_data_sheets/engineering_plastics_machining_guide.pdf.
20. *Sousledné frézování nebo nesousledné frézování* [online]. Sandvik Coromant [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx>.
21. DETERS, L. Springer *Handbook of Mechanical Engineering. Part B*. [s.l.]: [s.n.], Tribology, 2009, s. 295-326, ISBN 978-3-540-491.

22. CHATTOPADHYAY, R. *Advanced Thermally Assisted Surface Engineering Processes, Wear, Surface, Heat and Surface Engineering*, 2004, s. 1-47, ISBN 978-1-4020-7764-7.
23. BUMBÁLEK, L., BUMBÁLEK, B. *Pokrokové trendy v hodnocení textury povrchu*. IN Kvalita a GPS 2005, VUT – FSI Brno 2005.
24. ČSN EN ISO 4287: Geometrické požadavky na výrobu (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 1999, 24 s.
25. ČSN EN ISO 25178-2: Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 52 s.
26. Blanarovič, L. *Snižování drsnosti povrchu při frézování tvarových ploch*: Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie 2018, 72 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.
27. *Parametry drsnosti. HOMEL- ETAMIC* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.jenoptik.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
28. METELKOVÁ, J. Bakalářská práce: Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu. Brno: Vysoké učení technické, 2014. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Píška, CSc.
29. *TIVAR 1000 [PE] Polyetylen* [online]. Vyškov: PLASTUM Trading, 2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://plastum.cz/technicke-plasty-polyetyleny/tivar1000/>.
30. *TIVAR® 1000* [online]. Mitsubishi Chemical Advanced Materials, 2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.mcam.com/eu-en/products/engineering-plastics/moderate/tivarr-uhmw-pe-family-of-products/tivarr-1000/?r=1>.
31. *ERTACETAL [POM] Polyoxymetylen* [online]. Vyškov: PLASTUM Trading, 2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://plastum.cz/zakladni-technicke-plasty/ertacetal/>.
32. *Ertacetal® / Acetron®* [online]. Mitsubishi Chemical Advanced Materials, 2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.mcam.com/eu-en/products/engineering-plastics/engineering-80-160-c/ertacetalracetronr/>.
33. *ERTALON [PA] Polyamid* [online]. Vyškov: PLASTUM Trading, 2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://plastum.cz/zakladni-technicke-plasty/ertalon/>.
34. *Ertalon® and Nylatron® Products* [online]. Mitsubishi Chemical Advanced Materials, 2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.mcam.com/eu-en/products/engineering-plastics/engineering-80-160-c/ertalonr-and-nylatronr-products/>.
35. *KETRON PEEK [PEEK] Polyetereterketon* [online]. Vyškov: PLASTUM Trading, 2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://plastum.cz/spickove-technicke-plasty/peek/>.

36. *Ketron® PEEK* [online]. Mitsubishi Chemical Advanced Materials, 2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.mcam.com/eu-en/products/engineering-plastics/advanced-160-220-c/ketronr-peek/>.
37. PLASTUM TRADING. *Materiálový list – PE 1000* [online]. Nesovice, 2017 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: [https://plastum.cz/download/matlist/PE_1000\(CZ\).pdf](https://plastum.cz/download/matlist/PE_1000(CZ).pdf).
38. PLASTUM TRADING. *Materiálový list – POM C* [online]. Nesovice, 2016 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: [https://plastum.cz/download/matlist/POM_C\(CZ\).pdf](https://plastum.cz/download/matlist/POM_C(CZ).pdf).
39. PLASTUM TRADING. *Materiálový list – PA 6* [online]. Nesovice, 2016 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: [https://plastum.cz/download/matlist/PA_6\(CZ\).pdf](https://plastum.cz/download/matlist/PA_6(CZ).pdf).
40. PLASTUM TRADING. *Materiálový list – PEEK* [online]. Nesovice, 2016 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: [https://plastum.cz/download/matlist/PEEK\(CZ\).pdf](https://plastum.cz/download/matlist/PEEK(CZ).pdf).
41. Manuál stroje – *Pásová pila Bomar STG 220 G*, BOMAR, spol. s r.o.
42. Manuál stroje - *CNC frézka FV 25 CNC A*, TOS Olomouc, s.r.o.
43. Manuál stroje - *Hrotový soustruh TOS SV 18 RD/750*, TOS Trenčín.
44. *Kellenberger Kel Vista UR 175 Cylindrical CNC Grinder* [online]. JS Peters Machinery Sales [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: https://www.jspetersmach.com/assets/img/used_Kellenberger_Kel_Vista_grinder_UR_175.webp?h=b1471a679b1a2c1f0392fe77cbce5148.
45. Manuál stroje – *Bruska Kellenberger Kel Vista UR 175*, KELLENBERGER.
46. Manuál stroje - *Leštička Struers LaboPol 60*, STRUERS GmbH.
47. Manuál přístroje - *Talysurf CCI Lite*, TAYLOR HOBSON.
48. Manuál přístroje – *Mikroskop Olympus DSX500*, OLYMPUS.
49. Zvyšování kvality hodnocení struktury povrchu: Nosné parametry. *MM spektrum* [online]. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-kvality-hodnoceni-struktury-povrchu-2.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
a_p	[mm]	pracovní záběr
f	[mm/min]	posuvová rychlost
l_n	[mm]	vyhodnocovaná délka
l_r	[mm]	základní délka
l_t	[mm]	celková délka
Mr_1	[%]	podíl materiálu nad jádrem profilu drsnosti
Mr_2	[%]	podíl materiálu pod jádrem profilu drsnosti
n	[min ⁻¹]	otáčky
R_a	[μm]	průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti
R_{dq}	[°]	průměrný kvadratický sklon profilu drsnosti
R_k	[μm]	základní hloubka jádra profilu drsnosti
R_p	[μm]	největší výška výstupku profilu drsnosti
R_{pk}	[μm]	redukovaná výška vrcholů profilu drsnosti
R_q	[μm]	průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti
R_{Sm}	[mm]	průměrná šířka prvku profilu drsnosti
R_t	[μm]	celková výška profilu drsnosti
R_v	[μm]	největší hloubka prohlubně profilu drsnosti
R_{vk}	[μm]	redukovaná hloubka prohlubně profilu drsnosti
R_z	[μm]	největší výška profilu drsnosti
S_a	[μm]	aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu
S_k	[μm]	základní hloubka jádra drsnosti omezené stupnice povrchu
S_p	[μm]	maximální výška vrcholu omezené stupnice povrchu
S_{pk}	[μm]	redukovaná výška vrcholů omezené stupnice povrchu
S_q	[μm]	základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu
Sr_1	[%]	podíl materiálu nad jádrem drsnosti omezené stupnice povrchu
Sr_2	[%]	podíl materiálu pod jádrem drsnosti omezené stupnice povrchu
S_v	[μm]	maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu

Svk	[μm]	redukovaná hloubka údolí omezené stupnice povrchu
Sz	[μm]	maximální výška omezené stupnice povrchu
v_c	[m/min]	řezná rychlost
Z(x)	[μm]	výška posuzovaného profilu v poloze x
λ	[mm]	vlnová délka

Zkratka	Popis
ABS	akrylonitrilbutadienstyrene
CFRP	ceramic fibre reinforced polymer
GFRP	glass fibre reinforced polymer
LCP	liquid crystal polymer
PA	polyamide
PAI	polyamide-imide
PBI	polybenzimidazole
PC	polycarbonate
PCD	polycrystalline diamond
PE	polyethylene
PEEK	polyetheretherketone
PES	polyester
PET	polyethylenetereftalate
PFA	perfluoroalkoxyalkane
PI	polyimide
PMMA	polymethylmethakrylate
PMP	polymethylpentene
POM – C	polyoxymetylen copolymer
POM – H	polyacetal homopolymer
PP	polypropylene
PPE	polyphenylethere
PPS	polyphenylsulphide
PPSU	polypropylensulphone
PS	polystyrene

PTFE	polytetrafluorethene
PVC	polyvinylchloride
PVDF	polyvinylidene fluoride
SAN	styren-akrylonitril
TPI	thermoplastic polyimide
UHMC	ultra high molecular compound
UHMW	ultra high molecular weight

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Tivar 1000 – soustružené vzorky
Příloha 2	Tivar 1000 – frézované vzorky
Příloha 3	Tivar 1000 – broušené vzorky
Příloha 4	Tivar 1000 – leštěné vzorky
Příloha 5	Tivar 1000 – porovnání jednotlivých technologií obrábění
Příloha 6	Ertalon 6SA – soustružené vzorky
Příloha 7	Ertalon 6SA – frézované vzorky
Příloha 8	Ertalon 6SA – broušené vzorky
Příloha 9	Ertalon 6SA – leštěné vzorky
Příloha 10	Ertalon 6SA – porovnání jednotlivých technologií obrábění
Příloha 11	Ketron Peek 1000 – soustružené vzorky
Příloha 12	Ketron Peek 1000 – frézované vzorky
Příloha 13	Ketron Peek 1000 – broušené vzorky
Příloha 14	Ketron Peek 1000 – leštěné vzorky
Příloha 15	Ketron Peek 1000 – porovnání jednotlivých technologií obrábění

PŘÍLOHA 1

Tivar 1000 – soustružené vzorky

Vzorek	1.	2.	3.	4.	5.
Otáčky	2100 [min ⁻¹]	2280 [min ⁻¹]	2450 [min ⁻¹]	2600 [min ⁻¹]	2700 [min ⁻¹]
3D amplitudové parametry					
Sa [μm]	2,12	2,09	1,89	2,24	2,22
Sz [μm]	16,33	19,61	11,78	16,06	17,29
3D funkční parametry					
Sk [μm]	5,97	5,86	5,63	6,15	6,31
Spk [μm]	3,59	3,36	1,70	2,87	3,41
Svk [μm]	1,82	3,20	2,36	2,70	2,12
Sr1 [%]	12,81	10,83	6,89	13,14	7,75
Sr2 [%]	89,06	91,98	90,19	89,39	96,30
2D profilové parametry					
Ra [μm]	1,82	2,05	1,79	2,02	2,21
Rz [μm]	13,93	17,25	11,08	13,14	14,79
RSm [mm]	0,044	0,040	0,047	0,047	0,054
Rdq [°]	42,40	30,41	31,45	41,02	45,16
2D funkční parametry					
Rk [μm]	5,71	6,20	5,75	6,53	6,68
Rpk [μm]	3,51	3,44	1,71	2,07	3,04
Rvk [μm]	1,98	3,44	2,12	1,70	2,01
Mr1 [%]	14,19	10,56	7,72	11,24	18,12
Mr2 [%]	93,99	95,61	88,53	91,24	92,74

PŘÍLOHA 2

Tivar 1000 – frézované vzorky

Vzorek	1.		2.		3.		4.		5.	
Otáčky	3200 [min ⁻¹]		3425 [min ⁻¹]		3650 [min ⁻¹]		3900 [min ⁻¹]		4100 [min ⁻¹]	
Chlazení	NE	ANO	NE	ANO	NE	ANO	NE	ANO	NE	ANO
3D amplitudové parametry										
Sa [μm]	0,79	0,97	0,93	1,02	0,84	1,01	0,86	1,01	0,85	0,99
Sz [μm]	6,84	15,29	11,39	14,50	8,32	13,07	10,14	17,17	8,84	13,94
3D funkční parametry										
Sk [μm]	2,70	2,67	2,90	2,97	2,45	2,85	2,72	2,70	2,67	2,56
Spk [μm]	1,02	2,37	1,76	2,84	1,04	1,84	1,91	2,29	1,41	2,46
Svk [μm]	0,93	1,38	1,75	2,44	1,02	1,98	1,40	2,64	1,05	1,92
Sr1 [%]	7,14	9,87	7,95	12,51	12,78	13,65	6,94	11,91	6,67	11,15
Sr2 [%]	92,78	89,87	93,20	91,86	91,33	93,15	94,79	92,16	92,56	91,05
2D profilové parametry										
Ra [μm]	0,70	0,92	0,86	1,01	0,77	0,91	0,77	0,96	0,80	0,94
Rz [μm]	5,23	14,69	8,42	13,45	6,12	9,40	8,22	13,15	6,96	11,33
RSm [mm]	0,027	0,021	0,025	0,021	0,026	0,022	0,026	0,023	0,024	0,029
Rdq [°]	18,97	36,16	32,75	39,73	23,39	34,60	26,55	37,64	25,73	36,85
2D funkční parametry										
Rk [μm]	2,47	2,94	2,83	3,13	2,54	2,96	2,35	2,78	2,84	2,62
Rpk [μm]	0,72	1,43	1,35	1,99	0,76	1,50	1,27	2,05	1,05	2,26
Rvk [μm]	0,61	1,67	1,09	1,97	0,81	1,18	0,82	1,73	0,85	1,60
Mr1 [%]	6,29	10,16	8,69	11,91	10,53	13,20	9,67	13,40	6,26	14,04
Mr2 [%]	90,49	86,21	91,92	91,76	89,78	91,90	88,72	91,02	90,76	90,29

PŘÍLOHA 3

Tivar 1000 – broušené vzorky

Vzorek	1.	2.	3.	4.	5.
Otáčky	1000 [min ⁻¹]	1300 [min ⁻¹]	1600 [min ⁻¹]	1900 [min ⁻¹]	2200 [min ⁻¹]
3D amplitudové parametry					
Sa [μm]	0,59	0,59	0,58	0,60	1,41
Sz [μm]	4,37	5,37	4,62	6,32	14,58
3D funkční parametry					
Sk [μm]	1,46	1,56	1,54	1,62	3,52
Spk [μm]	0,53	0,60	0,71	0,75	2,18
Svk [μm]	0,91	1,26	0,87	0,96	2,35
Sr1 [%]	9,13	7,84	10,34	10,12	8,99
Sr2 [%]	86,43	83,69	89,54	89,12	85,89
2D profilové parametry					
Ra [μm]	0,58	0,60	0,58	0,61	1,14
Rz [μm]	4,07	5,132	4,10	5,55	11,48
RSm [mm]	0,035	0,045	0,041	0,044	0,033
Rdq [°]	11,13	10,62	10,01	13,95	34,79
2D funkční parametry					
Rk [μm]	1,99	1,44	1,55	1,43	3,57
Rpk [μm]	0,48	0,48	0,68	0,67	1,87
Rvk [μm]	0,83	1,55	0,88	0,86	2,31
Mr1 [%]	6,12	8,26	10,81	10,17	9,41
Mr2 [%]	85,94	83,46	85,52	92,85	85,86

PŘÍLOHA 4

Tivar 1000 – leštěné vzorky

Vzorek	1.	2.	3.	4.	5.
Otáčky	100 [min ⁻¹]	150 [min ⁻¹]	200 [min ⁻¹]	250 [min ⁻¹]	300 [min ⁻¹]
3D amplitudové parametry					
Sa [μm]	0,39	0,31	0,42	0,38	0,25
Sz [μm]	3,62	3,17	3,75	3,29	1,86
3D funkční parametry					
Sk [μm]	1,12	0,87	1,23	0,90	0,71
Spk [μm]	0,56	0,46	0,48	0,39	0,27
Svk [μm]	0,75	0,64	0,93	0,60	0,36
Sr1 [%]	9,68	9,21	8,30	9,14	9,34
Sr2 [%]	87,38	88,01	86,34	87,94	88,74
2D profilové parametry					
Ra [μm]	0,33	0,28	0,40	0,31	0,22
Rz [μm]	3,15	2,58	3,54	2,64	1,63
RSm [mm]	0,022	0,018	0,017	0,023	0,017
Rdq [°]	10,59	10,66	14,83	10,25	8,03
2D funkční parametry					
Rk [μm]	1,06	0,84	1,09	0,96	0,70
Rpk [μm]	0,37	0,39	0,38	0,35	0,22
Rvk [μm]	0,62	0,57	0,94	0,53	0,33
Mr1 [%]	8,67	9,47	8,69	7,79	9,26
Mr2 [%]	85,52	87,77	83,82	86,93	88,26

PŘÍLOHA 5

Tivar 1000 – porovnání jednotlivých technologií obrábění

	Soustruženo	Frézováno (na sucho)	Frézováno (chlazeno)	Broušeno	Leštěno
3D amplitudové parametry					
Sa [μm]	2,11	0,85	1,00	0,59	0,35
Sz [μm]	16,21	9,11	14,79	5,17	3,14
3D funkční parametry					
Sk [μm]	5,98	2,69	2,75	1,55	0,97
Spk [μm]	2,99	1,43	2,36	0,65	0,43
Svk [μm]	2,44	1,23	2,07	1,00	0,66
Sr1 [%]	10,28	8,30	11,82	9,36	9,13
Sr2 [%]	91,38	92,93	91,62	87,20	87,68
2D profilové parametry					
Ra [μm]	1,98	0,78	0,98	0,59	0,31
Rz [μm]	14,04	6,99	12,40	4,71	2,71
RSm [mm]	0,046	0,026	0,023	0,041	0,019
Rdq [°]	38,09	25,48	36,97	11,43	10,87
2D funkční parametry					
Rk [μm]	6,17	2,61	2,87	1,60	0,93
Rpk [μm]	2,75	1,03	1,85	0,58	0,34
Rvk [μm]	2,25	0,84	1,63	1,03	0,59
Mr1 [%]	14,17	8,29	12,54	8,84	8,78
Mr2 [%]	92,42	90,33	90,24	86,94	85,52

PŘÍLOHA 6

Ertalon 6SA – soustružené vzorky

Vzorek	1.	2.	3.	4.	5.
Otáčky	2100 [min ⁻¹]	2280 [min ⁻¹]	2450 [min ⁻¹]	2600 [min ⁻¹]	2700 [min ⁻¹]
3D amplitudové parametry					
Sa [μm]	1,34	1,45	1,54	1,51	1,11
Sz [μm]	15,68	17,71	15,3	16,86	12,22
3D funkční parametry					
Sk [μm]	3,50	3,85	3,79	4,52	2,76
Spk [μm]	3,36	3,17	2,65	3,18	1,72
Svk [μm]	2,49	3,40	3,50	2,94	2,65
Sr1 [%]	8,78	7,34	9,72	9,08	8,90
Sr2 [%]	83,02	86,74	85,02	89,38	84,55
2D profilové parametry					
Ra [μm]	1,19	1,39	1,42	1,47	1,09
Rz [μm]	11,72	14,01	12,95	13,50	10,47
RSm [mm]	0,027	0,028	0,028	0,030	0,029
Rdq [°]	44,58	52,96	44,12	48,39	36,55
2D funkční parametry					
Rk [μm]	3,50	3,74	3,94	4,58	2,81
Rpk [μm]	1,98	2,56	2,11	2,09	2,17
Rvk [μm]	1,85	2,62	3,16	2,35	2,43
Mr1 [%]	7,71	8,49	8,46	9,75	11,47
Mr2 [%]	83,66	83,34	83,40	92,50	84,42

PŘÍLOHA 7

Ertalon 6SA – frézované vzorky

Vzorek	1.		2.		3.		4.		5.	
Otáčky	3200 [min ⁻¹]		3425 [min ⁻¹]		3650 [min ⁻¹]		3900 [min ⁻¹]		4100 [min ⁻¹]	
Chlazení	NE	ANO	NE	ANO	NE	ANO	NE	ANO	NE	ANO
3D amplitudové parametry										
Sa [μm]	0,70	0,77	0,85	0,98	0,89	1,02	0,68	1,01	0,63	0,91
Sz [μm]	4,41	5,31	7,25	11,33	12,56	15,91	6,75	16,11	6,25	8,47
3D funkční parametry										
Sk [μm]	2,43	2,32	2,52	2,4	2,38	2,95	1,90	2,26	1,78	2,97
Spk [μm]	0,71	0,88	1,60	1,89	2,13	2,21	1,09	2,19	0,99	1,87
Svk [μm]	0,42	0,61	0,77	1,53	2,04	2,14	0,89	2,10	0,69	2,08
Sr1 [%]	8,39	10,40	6,32	12,95	11,70	12,37	12,74	12,00	10,85	10,52
Sr2 [%]	93,84	93,60	90,62	85,60	93,35	90,87	92,69	89,95	94,05	90,62
2D profilové parametry										
Ra [μm]	0,67	0,75	0,80	0,88	0,84	0,99	0,65	0,98	0,58	0,86
Rz [μm]	4,2	4,61	5,51	9,70	9,46	14,95	5,54	13,36	5,10	22,68
RSm [mm]	0,029	0,029	0,031	0,022	0,027	0,023	0,024	0,024	0,022	0,024
Rdq [°]	13,77	16,36	20,69	34,10	34,45	36,20	20,28	47,71	19,43	93,69
2D funkční parametry										
Rk [μm]	2,12	2,63	2,86	2,75	2,52	3,03	2,14	2,66	1,88	2,75
Rpk [μm]	0,84	0,62	0,60	1,66	1,62	1,73	1,05	1,70	0,83	1,04
Rvk [μm]	0,54	0,57	0,55	1,23	1,52	1,52	0,52	1,83	0,49	1,89
Mr1 [%]	11,75	6,85	5,23	12,53	11,66	11,61	10,53	11,91	9,74	9,34
Mr2 [%]	91,80	91,40	95,02	87,92	90,96	90,01	91,38	92,02	93,79	90,19

PŘÍLOHA 8

Ertalon 6SA – broušené vzorky

Vzorek	1.	2.	3.	4.	5.
Otáčky	1000 [min ⁻¹]	1300 [min ⁻¹]	1600 [min ⁻¹]	1900 [min ⁻¹]	2200 [min ⁻¹]
3D amplitudové parametry					
Sa [μm]	0,25	0,22	0,26	0,23	0,20
Sz [μm]	3,18	2,23	4,21	3,13	4,32
3D funkční parametry					
Sk [μm]	0,59	0,61	0,63	0,54	0,47
Spk [μm]	0,47	0,33	0,44	0,36	0,19
Svk [μm]	1,02	0,48	1,25	0,48	1,12
Sr1 [%]	10,20	10,62	9,73	11,83	10,50
Sr2 [%]	87,00	88,77	84,08	89,28	89,80
2D profilové parametry					
Ra [μm]	0,23	0,20	0,24	0,22	0,20
Rz [μm]	2,61	1,89	3,74	2,86	3,87
RSm [mm]	0,040	0,020	0,044	0,027	0,037
Rdq [°]	8,97	6,63	7,99	7,15	8,02
2D funkční parametry					
Rk [μm]	0,58	0,62	0,69	0,55	0,45
Rpk [μm]	0,49	0,32	0,27	0,40	0,16
Rvk [μm]	1,08	0,46	1,87	1,11	0,75
Mr1 [%]	10,94	7,97	6,86	12,57	9,26
Mr2 [%]	88,77	88,32	79,21	88,97	87,66

PŘÍLOHA 9

Ertalon 6SA – leštěné vzorky

Vzorek	1.	2.	3.	4.	5.
Otáčky	100 [min ⁻¹]	150 [min ⁻¹]	200 [min ⁻¹]	250 [min ⁻¹]	300 [min ⁻¹]
3D amplitudové parametry					
Sa [μm]	0,13	0,19	0,24	0,16	0,17
Sz [μm]	0,92	2,98	3,87	1,69	3,26
3D funkční parametry					
Sk [μm]	0,42	0,55	0,59	0,43	0,63
Spk [μm]	0,17	0,35	0,63	0,23	0,50
Svk [μm]	0,15	0,68	0,60	0,28	0,74
Sr1 [%]	10,92	8,5	11,51	10,48	9,45
Sr2 [%]	90,77	85,79	87,76	88,58	85,30
2D profilové parametry					
Ra [μm]	0,13	0,19	0,21	0,15	0,16
Rz [μm]	0,85	2,26	3,01	1,42	3,09
RSm [mm]	0,015	0,017	0,018	0,019	0,017
Rdq [°]	5,14	10,66	11,25	5,46	11,79
2D funkční parametry					
Rk [μm]	0,41	0,50	0,56	0,43	0,54
Rpk [μm]	0,17	0,23	0,54	0,21	0,37
Rvk [μm]	0,13	0,38	0,46	0,29	0,59
Mr1 [%]	11,03	9,86	12,54	10,95	10,32
Mr2 [%]	90,03	87,50	89,03	87,45	86,02

PŘÍLOHA 10

Ertalon 6SA – porovnání jednotlivých technologií obrábění

	Soustruženo	Frézováno (na sucho)	Frézováno (chlazeno)	Broušeno	Leštěno
3D amplitudové parametry					
Sa [μm]	1,39	0,75	0,94	0,23	0,18
Sz [μm]	15,55	7,44	11,43	3,41	2,54
3D funkční parametry					
Sk [μm]	3,69	2,20	2,58	0,57	0,52
Spk [μm]	2,81	1,30	1,81	0,36	0,37
Svk [μm]	2,99	0,96	1,69	0,87	0,49
Sr1 [%]	8,76	10,00	11,65	10,58	10,17
Sr2 [%]	85,74	92,91	90,13	87,79	87,64
2D profilové parametry					
Ra [μm]	1,31	0,71	0,89	0,22	0,17
Rz [μm]	12,53	5,96	13,06	2,99	2,13
RSm [mm]	0,028	0,027	0,024	0,033	0,017
Rdq [°]	45,32	21,72	25,61	7,75	8,86
2D funkční parametry					
Rk [μm]	3,71	2,3	2,76	0,58	0,49
Rpk [μm]	2,18	0,99	1,35	0,33	0,30
Rvk [μm]	2,48	0,72	1,41	1,05	0,37
Mr1 [%]	9,18	9,78	10,45	9,52	10,94
Mr2 [%]	85,46	92,59	90,31	85,59	88,01

PŘÍLOHA 11

Ketron Peek 1000 – soustružené vzorky

Vzorek	1.	2.	3.	4.	5.
Otáčky	2100 [min ⁻¹]	2280 [min ⁻¹]	2450 [min ⁻¹]	2600 [min ⁻¹]	2700 [min ⁻¹]
3D amplitudové parametry					
Sa [μm]	1,09	1,08	0,88	1,05	0,96
Sz [μm]	10,87	8,72	6,74	9,20	5,99
3D funkční parametry					
Sk [μm]	3,03	3,35	3,02	2,82	3,50
Spk [μm]	1,42	1,53	0,93	1,82	0,98
Svk [μm]	1,63	1,10	0,99	1,18	0,61
Sr1 [%]	16,48	8,02	5,80	5,68	5,61
Sr2 [%]	94,83	94,22	90,05	89,58	95,41
2D profilové parametry					
Ra [μm]	1,07	1,01	0,80	1,09	0,91
Rz [μm]	8,82	6,57	5,92	7,89	5,33
RSm [mm]	0,036	0,040	0,040	0,043	0,045
Rdq [°]	28,13	20,70	15,92	25,95	15,23
2D funkční parametry					
Rk [μm]	2,89	2,95	2,56	3,05	3,40
Rpk [μm]	1,28	1,13	0,78	1,68	1,00
Rvk [μm]	1,32	0,48	1,01	1,40	0,63
Mr1 [%]	19,47	17,49	6,87	4,21	6,07
Mr2 [%]	93,12	94,54	89,74	80,96	94,92

PŘÍLOHA 12

Ketron Peek 1000 – frézované vzorky

Vzorek	1.		2.		3.		4.		5.	
Otáčky	3200 [min ⁻¹]		3425 [min ⁻¹]		3650 [min ⁻¹]		3900 [min ⁻¹]		4100 [min ⁻¹]	
Chlazení	NE	ANO	NE	ANO	NE	ANO	NE	ANO	NE	ANO
3D amplitudové parametry										
Sa [μm]	0,54	0,90	0,57	0,92	0,73	1,01	0,99	0,93	0,91	1,05
Sz [μm]	3,63	5,71	6,95	11,02	11,87	12,54	15,42	9,58	10,51	17,63
3D funkční parametry										
Sk [μm]	1,81	3,29	1,71	2,68	2,04	3,36	2,40	2,47	2,40	2,55
Spk [μm]	0,57	0,71	0,99	1,72	2,02	1,81	2,07	1,29	1,52	2,74
Svk [μm]	0,45	0,80	0,83	1,68	1,63	1,74	2,29	1,24	1,36	2,97
Sr1 [%]	6,61	4,30	7,67	6,83	7,38	10,98	11,16	7,40	9,09	9,84
Sr2 [%]	90,91	94,85	90,02	85,98	91,43	91,83	92,22	91,25	91,79	91,29
2D profilové parametry										
Ra [μm]	0,52	0,86	0,54	0,85	0,71	0,91	0,84	0,87	0,83	0,93
Rz [μm]	3,23	4,88	4,88	8,45	9,45	9,27	10,98	7,35	7,16	12,96
RSm [mm]	0,027	0,024	0,027	0,025	0,027	0,025	0,026	0,026	0,028	0,023
Rdq [°]	11,24	21,18	16,16	20,21	21,19	22,07	20,47	24,97	26,17	18,09
2D funkční parametry										
Rk [μm]	1,80	3,07	1,80	2,62	2,09	3,12	2,35	2,45	2,77	2,59
Rpk [μm]	0,45	0,48	0,74	1,27	1,60	1,41	1,94	0,98	0,91	1,98
Rvk [μm]	0,40	0,79	0,60	1,45	1,35	1,35	1,69	1,03	0,95	1,77
Mr1 [%]	6,75	3,55	8,64	6,98	9,58	11,91	13,21	9,54	8,56	9,88
Mr2 [%]	89,71	92,25	89,84	87,43	90,43	90,96	89,50	90,57	91,45	89,68

PŘÍLOHA 13

Ketron Peek 1000 – broušené vzorky

Vzorek	1.	2.	3.	4.	5.
Otáčky	1000 [min ⁻¹]	1300 [min ⁻¹]	1600 [min ⁻¹]	1900 [min ⁻¹]	2200 [min ⁻¹]
3D amplitudové parametry					
Sa [μm]	0,27	0,24	0,26	0,24	0,26
Sz [μm]	2,55	1,87	2,2	1,73	2,02
3D funkční parametry					
Sk [μm]	0,81	0,74	0,77	0,74	0,77
Spk [μm]	0,61	0,27	0,35	0,30	0,32
Svk [μm]	0,39	0,38	0,45	0,35	0,32
Sr1 [%]	11,47	9,45	10,24	9,79	10,68
Sr2 [%]	89,52	88,95	89,04	89,03	90,73
2D profilové parametry					
Ra [μm]	0,24	0,22	0,23	0,21	0,27
Rz [μm]	2,23	1,65	2,03	1,60	1,88
RSm [mm]	0,019	0,020	0,021	0,020	0,028
Rdq [°]	7,94	6,41	6,21	6,33	5,88
2D funkční parametry					
Rk [μm]	0,72	0,73	0,64	0,70	0,79
Rpk [μm]	0,40	0,21	0,34	0,30	0,32
Rvk [μm]	0,24	0,32	0,61	0,24	0,32
Mr1 [%]	9,75	9,28	10,25	11,41	10,08
Mr2 [%]	91,26	89,66	87,95	91,56	87,88

PŘÍLOHA 14

Ketron Peek 1000 – leštěné vzorky

Vzorek	1.	2.	3.	4.	5.
Otáčky	100 [min ⁻¹]	150 [min ⁻¹]	200 [min ⁻¹]	250 [min ⁻¹]	300 [min ⁻¹]
3D amplitudové parametry					
Sa [μm]	0,12	0,16	0,13	0,17	0,12
Sz [μm]	1,04	1,24	1,12	1,52	0,97
3D funkční parametry					
Sk [μm]	0,36	0,48	0,37	0,46	0,35
Spk [μm]	0,19	0,19	0,18	0,20	0,15
Svk [μm]	0,17	0,25	0,20	0,36	0,19
Sr1 [%]	10,57	9,79	9,75	9,56	9,58
Sr2 [%]	89,82	88,74	88,25	86,66	88,83
2D profilové parametry					
Ra [μm]	0,10	0,14	0,11	0,17	0,11
Rz [μm]	0,92	1,04	0,86	1,41	0,83
RSm [mm]	0,013	0,015	0,013	0,018	0,015
Rdq [°]	5,27	6,3	5,15	6,05	4,82
2D funkční parametry					
Rk [μm]	0,31	0,45	0,33	0,47	0,36
Rpk [μm]	0,15	0,13	0,12	0,17	0,09
Rvk [μm]	0,13	0,24	0,21	0,37	0,19
Mr1 [%]	10,02	8,83	8,97	7,72	8,05
Mr2 [%]	89,77	88,26	87,74	85,72	87,25

PŘÍLOHA 15

Ketron Peek 1000 – porovnání jednotlivých technologií obrábění

	Soustruženo	Frézováno (na sucho)	Frézováno (chlazeno)	Broušeno	Leštěno
3D amplitudové parametry					
Sa [μm]	1,01	0,75	0,96	0,25	0,14
Sz [μm]	8,30	9,68	11,30	2,07	1,18
3D funkční parametry					
Sk [μm]	3,14	2,07	2,27	0,76	0,40
Spk [μm]	1,34	1,43	1,65	0,37	0,18
Svk [μm]	1,10	1,31	1,68	0,38	0,23
Sr1 [%]	8,32	8,38	7,87	10,33	9,85
Sr2 [%]	92,82	91,27	91,04	89,45	88,46
2D profilové parametry					
Ra [μm]	0,98	0,69	0,88	0,23	0,13
Rz [μm]	6,91	7,14	8,58	1,88	1,02
RSm [mm]	0,045	0,027	0,025	0,022	0,015
Rdq [°]	21,19	19,05	21,30	6,55	5,52
2D funkční parametry					
Rk [μm]	2,97	2,16	2,17	0,72	0,38
Rpk [μm]	1,17	1,13	1,22	0,31	0,13
Rvk [μm]	0,97	1,00	1,28	0,35	0,23
Mr1 [%]	10,82	9,35	8,37	10,15	8,72
Mr2 [%]	90,66	90,19	90,18	89,66	87,75